

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**Novas metodologias não destrutivas de inspeção de materiais
relacionados com pedra e betão**

Sara Filipa Costa dos Santos

Mestrado Integrado em Engenharia Física

Dissertação orientada por:

Doutora Ana Maria da Gama Mateus Cabral

Professora Doutora Olinda Maria Quelhas Fernandes Conde

2019

*"The important thing is not to stop questioning.
Curiosity has its own reason for existing."
Albert Einstein*

Agradecimentos

O tão esperado curso está a chegar ao fim. É agora altura de parar um pouco e olhar para trás, avaliar todo o tempo que passou e agradecer a quem realmente o marcou. Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais e ao meu irmão por todas as horas passadas a ouvir as minhas birras e descomplicar tudo o que eu tornava ainda mais complicado. Eu sei, é difícil! Um especial obrigada ao meu pai que me ajudou transmitindo todo o seu conhecimento sobre a pedra, teria sido mais difícil sem ele. Aos familiares e grandes amigos que me apoiaram durante estes anos com gestos que nunca vou esquecer. A todos os meus colegas de curso com os quais adorei trabalhar e não só. À Alexandra, Cláudia, Constança, Carolina, Nuno, Miguel, Guilherme, Rodrigo, Inês, André. A todos vocês, com os quais aprendi tanto... A amizade que cultivámos durante estes anos vai durar a vida toda. Aos meus amigos de infância que sempre souberam o quão importante este curso era para mim e com os quais desabafei muito durante estes últimos anos. Um especial obrigado do fundo do coração à Bruna, que leva comigo tantas e tantas vezes, por vezes durante dias inteiros. Um ombro que sei que estará lá sempre que eu precisar.

Às minhas orientadoras que tornaram possível a realização desta tese na FCUL e no ISQ. Aos meus colegas de trabalho e orientadores de laboratório Eng. José Pedro Sousa e Eng. David Alface Santos que me ajudaram tanto e apoiaram nas decisões durante estes últimos seis longos meses. A todos os meus colegas de laboratório que me apoiaram sempre e fizeram de tudo para que o ambiente de trabalho fosse fantástico. Adorei trabalhar com todos vocês.

Um muito obrigada a todos os que partilharam estes momentos comigo, aos que enumerei e àqueles que não o fiz mas que nem por isso deixam de ser importantes. Devo aquilo que sou hoje a muitos de vocês que me orientaram nos momentos mais difíceis. Acabo esta etapa da minha vida muito mais rica, não só em conhecimento, mas também em amizade.

MUITO OBRIGADA!

Resumo

Esta dissertação foi realizada em parceria com o Laboratório de Ensaios Não Destrutivos do Instituto de Soldadura e Qualidade, onde todo o trabalho de investigação foi desenvolvido.

Métodos não destrutivos baseados em ultrassons são frequentemente utilizados em inspeção de materiais metálicos, fabrico e inspeção a matérias-primas, e em soldaduras. A extensão destes métodos a materiais como a pedra surge após a necessidade das empresas de exploração e transformação da matéria-prima em diminuir o desperdício aquando o corte e o tratamento desta, para o consumidor final. Uma chapa de pedra tem medidas *standard* de $1600mm \times 2500mm$, podendo ter, normalmente, espessuras de $20mm$, $30mm$ ou $40mm$, sendo a primeira medida a espessura alvo dos ensaios não destrutivos. É a partir desta chapa que se chega ao produto final que poderá ter fins como o revestimento, a pavimentação, tampos de cozinha e casa de banho, degraus, cantarias e mobiliário. A quantidade de desperdício que uma chapa pode ter aquando cortada para os fins desejados é diretamente proporcional à quantidade de defeitos que esta contém. Este motivo tem uma grande influência no preço praticado ao consumidor final, uma vez que, de modo a ser garantido um determinado produto final há a necessidade da garantia de matéria-prima suficiente para tal.

O objetivo desta dissertação será o desenvolvimento de um método não destrutivo de inspeção que permita a avaliação e a caracterização de defeitos presentes nas peças, de modo a permitir um maior aproveitamento da chapa. Este método de inspeção poderá ser realizado aquando o último estágio do polimento em simultâneo com a inspeção visual do mesmo. Desta forma, não será necessário adicionar um material acusticamente condutor, uma vez que a água já o é, não prejudicando a inspeção paralela.

Palavras-chave: Inspeção, Não Destrutivos, Pedra, Ultrassons

Abstract

This thesis was conducted in partnership with Laboratório de Ensaios Não Destrutivos do Instituto de Soldadura e Qualidade, where all the research work was developed.

Ultrasonic-based non-destructive methods are often used in the inspection of metallic materials, in their manufacture and inspection of raw materials, and in welds. The extension of this method to materials such as stone arises after exploit and transformation companies need to reduce waste when cutting and processing raw materials, for the final consumer. A stone plaque has measures of $1600mm \times 2500mm$, which may have, normally, the thickness of $20mm$, $30mm$ or $40mm$, being the first measurement the target thickness of non-destructive tests. From this plate comes the final product which can have purposes such as flooring, paving, kitchen and bathroom tops, steps, stonework and furniture. The amount of waste that a plate can have when cut to the desire purpose is directly proportional to the quantity of defects that it contains. This reason has a great influence on the practiced price to the final consumer, because in order to be assured a certain final product there is need to assure enough quantity of raw material for that.

The goal of this thesis will be the development of a non-destructive method of inspection that allows the evaluation and characterization of present defects in the pieces, in order to allow a great use of the plaque. This inspection method should be performed at the last stage of the polishing stage at the same time as it's visual inspection. In this way, it will not be necessary to add an acoustically conductive material, since water already is one, hence not damaging the parallel inspection.

Keywords: Inspection, Non-destructive, Stone, Ultrasound

Índice

Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do trabalho	1
1.1.1 Estado da arte	2
1.2 Análise morfológica, micro estrutural e química	4
1.2.1 Microscopia Ótica	4
1.2.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento e Espetroscopia de Dispersão em Energia	4
1.3 Ensaios Destrutivos	4
1.3.1 Ensaios Mecânicos	4
1.4 Ensaios Não Destrutivos	5
1.4.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X	5
1.4.2 Ultrassons	5
1.4.2.1 Ultrassons Convencionais	10
1.4.2.2 Ultrassons <i>Phased Array</i>	12
2 Desenvolvimento	15
2.1 Análise morfológica, micro estrutural e química	15
2.1.1 Microscopia Ótica	15
2.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento e Espetroscopia de Dispersão em Energia	15
2.2 Ensaios Não Destrutivos	16
2.2.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X	16
2.2.2 Ultrassons Convencionais	16
2.2.3 Ultrassons <i>Phased Array</i>	17
3 Resultados e Discussão	19
3.1 Análise morfológica, micro estrutural e química	19
3.1.1 Microscopia Ótica	19
3.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento e Espetroscopia de Dispersão em Energia	23
3.2 Ensaios Destrutivos	27
3.2.1 Ensaios Mecânicos	27
3.3 Ensaios Não Destrutivos	27
3.3.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X	27
3.3.2 Ultrassons Convencionais	31
3.3.3 Ultrassons <i>Phased Array</i>	43

ÍNDICE

4 Conclusão	51
5 Trabalhos Futuros	53
Bibliografia	55

Lista de Figuras

1.1	Gráficos adaptados de [3].	1
1.2	Fotografia de pedra com fissuras naturais.	2
1.3	Esquema ilustrativo das técnicas de contacto por ultrassons.	3
1.4	Esquemas ilustrativos da reflexão de ondas sonoras num meio.	6
1.5	Representação A do sinal obtido depois do equipamento receber a reflexão de uma onda.	7
1.6	Esquema ilustrativo das representações do sinal mais comuns, utilizadas em equipamentos de ultrassons, onde os defeitos representados são furos de fundo plano. Adaptado de [12].	8
1.7	Sondas de ultrassons: sondas convencionais à direita e sondas <i>phased array</i> à esquerda da imagem. Adaptado de [13, 8].	8
1.8	Feixe de onda típico de uma sonda convencional monocristal de 2MHz de frequência. Adaptado de catálogo disponível em [13].	9
1.9	Exemplos de calços utilizados em sondas de ultrassons: calços acoplados às sondas à direita e calços adaptáveis às sondas ao centro e esquerda da figura.	10
1.10	Esquemas da constituição de sondas.	11
1.11	Feixes de onda típicos de sondas monocristal, à direita e duplo cristal, à esquerda. Adaptado de [9].	12
1.12	Esquema de <i>phased array</i> . Adaptado de [8].	12
1.13	Esquemas ilustrativos da formação de feixes orientados. Adaptado de [12].	13
1.14	Esquema dos feixes típicos de sondas de <i>phased array</i> em comparação com sondas convencionais angulares. Adaptado de [12].	13
3.1	Fotografia obtida a partir do microscópio ótico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-02.	20
3.2	Fotografia obtida a partir do microscópio ótico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-03.	21
3.3	Fotografia obtida a partir do microscópio ótico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-04.	22
3.4	Gráfico das medições realizadas aos grãos de cada amostra em função da quantidade de grãos em intervalos de 0, 1mm.	22
3.5	Imagem MEV de um poro, da superfície da amostra L-04, analisado com ampliação de 1400x, da qual foram retirados vários espetros para análise.	23
3.6	Imagem representativa da zona da superfície representada na figura anterior, com identificação dos locais onde foram retirados os espetros para análise dos elementos presentes em cada local.	24

LISTA DE FIGURAS

3.7	Espetro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 44 na Figura 3.6.	24
3.8	Espetro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 45 na Figura 3.6.	25
3.9	Imagem representativa da zona da superfície com ampliação de 55x, da qual foram retirados vários espectros para análise.	25
3.10	Imagem representativa da zona da superfície representada na figura anterior, com identificação dos locais onde foram retirados os espectros para análise dos elementos presentes em cada local.	26
3.11	Espetro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 65 na Figura 3.10.	26
3.12	Espetro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 66 na Figura 3.11.	27
3.13	Radiografia realizada à amostra L-001.	28
3.14	Radiografia realizada à amostra L-002.	28
3.15	Radiografia realizada à amostra L-003.	28
3.16	Radiografia realizada a descontinuidade interna detetada com técnicas de <i>phased array</i> , na amostra L-001.	29
3.17	Radiografia realizada outra descontinuidade interna detetada com técnicas de <i>phased array</i> , na amostra L-001.	29
3.18	Fotografia de detalhe das descontinuidades dos provetes mostrando as diferentes orientações para radiografia: vertical à fonte à esquerda e horizontal à fonte à direita. . .	29
3.19	Fotografia de detalhe do interior da descontinuidade de um dos provetes da figura 3.18. .	30
3.20	Radiografia realizada a provetes com descontinuidades naturais de grandes dimensões orientadas verticalmente com a fonte de Raios-X.	30
3.21	Radiografia realizada a provetes com descontinuidades naturais de grandes dimensões orientadas horizontalmente com a fonte de Raios-X.	30
3.22	Sinal de atenuação obtido com sonda de 1MHz, K1SM com um cristal de diâmetro 28mm. .	31
3.23	Sinal de atenuação obtido com sonda de 2MHz, G2ND com um cristal de diâmetro 28mm. .	32
3.24	Sinal de atenuação obtido com sonda de 2MHz, MSEB 2 com dois cristais de diâmetro de 11mm cada.	32
3.25	Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-02 durante a mesma.	33
3.26	Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-02-5.	34
3.27	Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-03 durante a mesma.	34
3.28	Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-03-5.	35
3.29	Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-03-2, na deteção de um defeito.	35
3.30	Detalhe do provete L-03-2, detetado na figura 3.29	35
3.31	Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-04 durante a mesma.	36
3.32	Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-04-2.	36
3.33	Sinal obtido com a calibração que apresentava melhor atenuação do som.	37

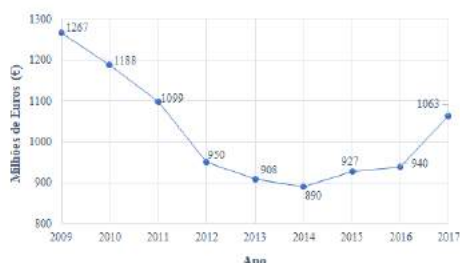
3.34	Fotografia do detalhe do defeito conhecido na amostra (superfície inferior à superfície de contacto).	38
3.35	Sinal de resposta obtido na zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.34.	38
3.36	Fotografia do detalhe dos defeitos artificiais na superfície oposta à superfície de contacto.	39
3.37	Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.36.	39
3.38	Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.36.	40
3.39	Fotografia do detalhe dos defeitos artificiais na superfície oposta à superfície de contacto.	40
3.40	Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.39.	41
3.41	Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.39.	41
3.42	Fotografia da zona no centro da amostra onde o sinal de resposta apresenta um comportamento diferente.	42
3.43	Sinal de resposta obtido ao longo da zona indicada na figura 3.42.	42
3.44	Sinal de resposta obtido ao longo da zona indicada na figura 3.42.	43
3.45	Sinal obtido com um feixe constituído por 4 elementos, utilizando uma sonda de 1MHz.	44
3.46	Sinal obtido com um feixe constituído por 4 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.	44
3.47	Sinal obtido com um feixe constituído por 8 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.	45
3.48	Sinal obtido com um feixe constituído por 16 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.	45
3.49	Sinal obtido na zona de defeitos artificiais da amostra, utilizando gel como líquido condutor.	46
3.50	Sinal obtido na zona de defeitos artificiais da amostra, utilizando água como líquido condutor.	46
3.51	Aquisição de sinal na zona de uma descontinuidade, à qual foi realizada uma radiografia presente na secção anterior.	47
3.52	Aquisição de sinal na zona de uma descontinuidade, à qual foi realizada uma radiografia presente na secção anterior.	47
3.53	Aquisição de sinal numa zona onde foram feitos furos com diferentes diâmetros: 1,5mm, 3mm, 4mm e 5mm.	48
3.54	Gráfico de atenuação em dB em função da profundidade em mm, para diversas amostras.	48

Capítulo 1

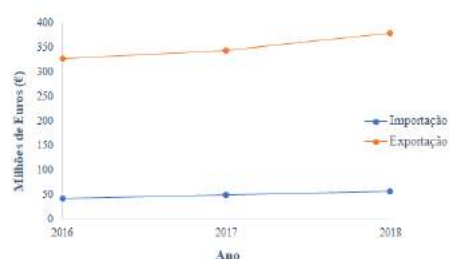
Introdução

1.1 Contextualização do trabalho

O sector da pedra ornamental é um sector em crescimento em todo o país. Desde as indústrias de extração às indústrias de transformação da pedra, verifica-se nos últimos quatro a cinco anos um crescimento acentuado do número de empresas em todo o território nacional. Este é um sector com bastante importância na economia nacional havendo, inclusive, várias regiões do país que dele dependem uma vez que é um sector que emprega cada vez mais mão de obra. Esta indústria movimenta-se não só dentro mas também fora do país, sendo Portugal bastante conhecido pelas suas pedras ornamentais. Tem-se ao longo dos últimos anos assistido a uma valorização desta matéria prima que tem vindo a ser cada vez mais utilizada em diversos fins um pouco por todo o mundo [3]. É, por isso, importante reduzir ao máximo a produção de desperdício desta matéria prima, principalmente, aquando da sua transformação, encaminhando-os nos seus diversos estágios para os mais variados fins e reduzindo a sua produção.



(a) Gráfico volume de negócios do sector.



(b) Gráfico comércio internacional.

Figura 1.1: Gráficos adaptados de [3].

A indústria de transformação de pedra produz anualmente grandes quantidades de desperdício do material, que poderiam ser reduzidas caso fosse possível um melhor planeamento no ato do corte. Hoje em dia, são realizados diversos estudos desta matéria prima conhecendo-se muito bem características físico-químicas como a sua dureza, a resistência ao desgaste e a impactos, a sua porosidade e a capacidade de absorção de líquidos. Porém, o conhecimento destas características não é suficiente para a redução do desperdício produzido na indústria de transformação uma vez que este se deve a descontinuidades internas na pedra. Ora, durante todo o processo de transformação, a pedra passa por diversas fases de inspeção que permitem determinar a existência de imperfeições ou fissuras na superfície da peça que está a ser transformada. A maior parte destes testes são realizados na fase de polimento, quando a peça de pedra é uma chapa de espessura variável entre 20mm e 40mm, sendo a superfície a polir analisada

1. INTRODUÇÃO

a cada transição de panos de polimento de diferentes grãos. Quando detetadas falhas na superfície o processo anterior é repetido ou a peça é marcada sendo rejeitada para determinados fins. Após este processo, a peça é encaminhada para a fase de corte. É nesta fase que a produção de desperdício aumenta abruptamente sendo frequente a observação da quebra da chapa durante o processo.



Figura 1.2: Fotografia de pedra com fissuras naturais.

Pretende-se desenvolver um método de inspeção com base em ensaios não destrutivos que permita a determinação do estado interno da peça a transformar. Este método de inspeção visa o melhor acompanhamento na fase de corte da pedra de modo a evitar zonas com fissuras internas, evitando a quebra da chapa que, na maior parte das vezes, diminui o seu aproveitamento.

1.1.1 Estado da arte

Os métodos de inspeção visuais frequentemente utilizados neste tipo de material, são realizados em testes na fase de polimento da peça, permitindo avaliar o estado da superfície da mesma quanto à existência de imperfeições, como por exemplo riscos. Estes métodos permitem apenas a deteção de defeitos superficiais, não sendo possível saber o estado do interior da peça inspecionada. É na fase de corte e na fase de acabamento que a produção de desperdício aumenta, uma vez que é nestas fases que se dá a fratura das peças causadas por fissuras internas que se vêm a descobrir neste estágio da transformação.

Ao longo dos tempos, a pedra tem sido um material alvo de poucos estudos direcionados para o estado do seu interior. Técnicas de ultrassons já foram utilizadas neste tipo de material, como o granito, mármore, *Limestone* e betão, mas na sua maioria, com o objetivo de determinar a velocidade média de propagação do som [4, 5, 10, 11, 14, 15, 16]. Até então escassos são os registos da utilização de técnicas de ultrassons para medição de espessuras deste material. A deteção de discontinuidades interiores de peças em pedra foi já alvo de estudo recorrendo a sondas de ultrassons mas é recorrente a utilização de duas sondas de ultrassons, uma para enviar os impulsos e outra para receber, técnicas de transmissão [5, 15, 16]. As espessuras do material frequentemente mencionadas são superiores a 50mm e os tipos de pedra alvos de mais estudos deste tipo têm sido os granitos.

1.1 Contextualização do trabalho

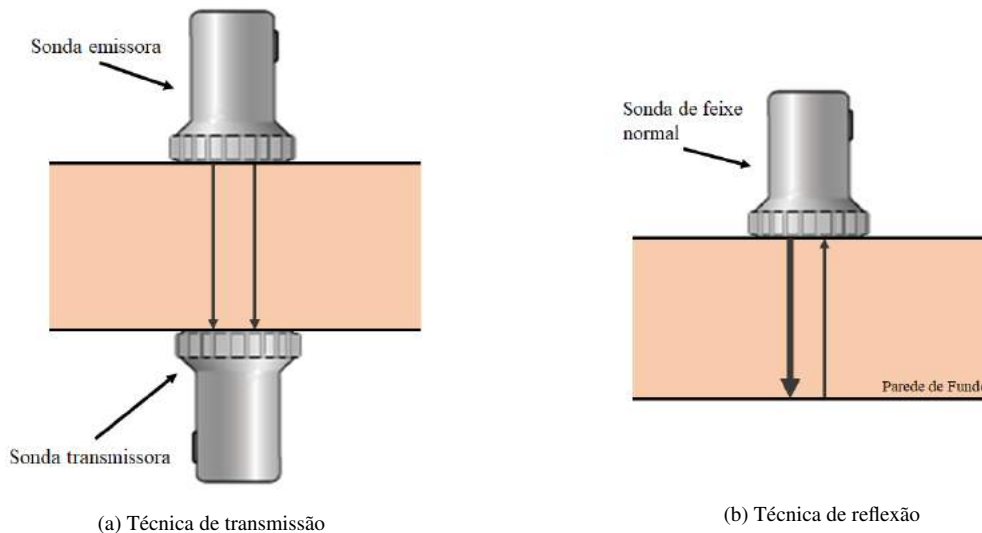


Figura 1.3: Esquema ilustrativo das técnicas de contacto por ultrassons.

Tendo em conta que este material é muito atenuante e de grão grosso, as frequências mais aplicadas a estes estudos são da ordem de algumas centenas de kHz [4, 11, 15, 2]. De acordo com as sondas disponibilizadas para o desenvolvimento do estudo proposto, será estudado o comportamento dos sinais obtidos com sondas de frequências típicas entre $500kHz$ e os $7MHz$. A frequência mais adequada será escolhida com base na qualidade do sinal visualizado no equipamento de ultrassons utilizado e tendo em conta a sensibilidade do sinal. Isto é, tendo em conta a ordem de grandeza dos defeitos típicos apresentados pelo material em estudo, uma vez que esta sensibilidade é influenciada diretamente pelo comprimento de onda, uma vez que é dada por

$$sensibilidade = \frac{1}{2}\lambda. \quad (1.1)$$

Acerca do tipo de pedra sobre o qual o presente estudo vai incidir, sabe-se que é de origem calcária e que, por isso, é uma rocha com uma menor coesão entre os seus grãos, dando origem a uma grande anisotropia. Esta anisotropia vai ser responsável pela diminuição da velocidade de propagação das ondas de som num meio que, à partida, seria o meio rochoso de propagação mais rápido [6].

Na presente dissertação vem-se, portanto, propor o desenvolvimento de métodos de inspeção não destrutivos de peças de pedra do tipo *Limestone*, para deteção de defeitos internos. A espessura alvo de maior interesse será de $20mm$ uma vez que é a espessura *standard* com maior aplicabilidade no mercado. Para tal, propõem-se estudar a análise morfológica, micro estrutural e química do material em causa, assim como, o seu comportamento perante ensaios mecânicos, inspeção não destrutiva na forma de Raios-X e ultrassons utilizando sondas convencionais e *Phased Array*.

Devido ao facto deste material não ter sido alvo de estudos elaborados do seu interior, houve a necessidade de aprofundar o conhecimento deste material antes de iniciar o estudo com técnicas de ultrassons, visando à melhor aplicação destas técnicas no material. Deste modo, foram realizadas análises morfológicas a diversas amostras à disposição, análises micro estruturais e químicas de modo a perceber quais os elementos químicos nelas presentes, tendo em conta que este é um tipo de pedra calcária.

1. INTRODUÇÃO

1.2 Análise morfológica, micro estrutural e química

1.2.1 Microscopia Ótica

O microscópio ótico permite o estudo da morfologia de uma determinada superfície em estudo. Este instrumento recorre à luz visível, fazendo-a incidir sobre uma superfície, corte transversal da peça, iluminando-a. A imagem é produzida a partir da reflexão da luz pela superfície. Através da utilização de filtros e dispositivos de condicionamento é possível manipular o contraste da imagem observada tendo em conta diversas propriedades da amostra analisada e parâmetros da técnica que é aplicada na análise. A imagem observada à objetiva deste microscópio é uma imagem virtual ampliada da imagem real da superfície observada, tantas vezes quanto a potência das lentes utilizadas. Esta técnica será utilizada para dimensionamento do grão das amostras em estudo de modo a estudar em pormenor a morfologia de cada uma delas [17].

1.2.2 Microscopia Eletrônica de Varrimento e Espectroscopia de Dispersão em Energia

O microscópio eletrónico de varrimento tem a capacidade de produzir imagens da superfície da amostra em estudo com elevada resolução. Da interação do feixe de eletrões emitido pelo microscópio com os eletrões da superfície resultam fotões que são detetados pelos foto-multiplicadores do microscópio sendo estes direcionados para os processadores onde será produzida a imagem. A par com os foto-detetores este microscópio tem acoplado um detetor de EDS, que realiza a espectroscopia de dispersão em energia, a partir da deteção dos eletrões dispersos resultado da interação do feixe de eletrões com a superfície. Esta análise permite determinar a composição química da amostra em estudo. A partir da imagem gerada é, ainda, possível observar o aspeto topográfico da superfície da amostra e estudar a sua estrutura.

Este tipo de microscópio utiliza um canhão de emissão de campo composto por um elétrodo de extração e um cátodo que possui pontas afiadas de tungsténio. Entre este elétrodo de extração e o cátodo é aplicada uma tensão da ordem de milhares de Volts, criando um campo elétrico forte na ponta do cátodo. Desta forma, vão ser emitidos eletrões por efeito de túnel. Este processo necessita de um ambiente com condições de vácuo de modo a potenciar a propagação do feixe de eletrões e, também, conservar a superfície do cátodo sempre limpa, protegida do bombardeamento de iões, estabilizando a emissão de eletrões. Pois a quantidade de eletrões emitidos vai depender das condições da superfície do cátodo. Da interação dos eletrões emitidos com a superfície da amostra, são emitidos eletrões secundários, eletrões dispersos, raios-X característicos e eletrões de Auger da superfície. Este tipo de microscópio pode ser dotado de diversos equipamentos com o objetivo de detetar todo este tipo de radiação da qual podem ser realizados diversos estudos. Esse é o caso do espectroscópio de Dispersão em Energia que vai detetar os eletrões dispersos e identificar a energia de cada um associando-o ao elemento químico correspondente [7].

1.3 Ensaios Destrutivos

1.3.1 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos que se pretendem realizar ao material baseiam-se em ensaios de tensão de modo a determinar as suas propriedades mecânicas. Este estudo é realizado com auxílio de equipamento próprio e permite a caracterização de materiais a partir da determinação de propriedades como a sua dureza, elasticidade, plasticidade, tenacidade, resiliência e ductibilidade. Após estes ensaios, as amostras

ficam total ou parcialmente destruídas o que impede a sua reutilização.

O estudo que se pretende realizar ao material consiste na determinação da curva de tensão-deformação de cada amostra e de parâmetros como o coeficiente de Poisson e o Módulo de Young. Pois a partir destes dois últimos será possível chegar à velocidade de propagação do som característica de cada amostra, o que permitirá retirar algumas conclusões quando comparadas com os resultados obtidos nos Ensaios Não Destrutivos.

1.4 Ensaios Não Destrutivos

1.4.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X

A radiografia industrial utilizando Raios-X é uma técnica não destrutiva, muito utilizada na inspeção de materiais metálicos, nomeadamente soldaduras, na deteção de defeitos internos. Porém, é uma técnica que confere riscos de exposição a radiação ionizante muito perigosa para todos os seres vivos, assim como, necessita de um filme onde serão impressos todos os resultados obtidos para posterior análise após revelação do mesmo ou não, no caso da radiografia digital. Esta técnica torna-se pouco vantajosa em diversos casos uma vez que, devido ao facto de ser prejudicial à saúde, requer o cumprimento de determinadas normas de segurança [1].

1.4.2 Ultrassons

Hoje em dia, os ultrassons desempenham um papel muito importante nas técnicas de ensaio não destrutivo sendo aplicados na deteção de descontinuidades interiores e na medição de espessuras. São técnicas não destrutivas que não necessitam da utilização de radiações ionizantes e que permitem obter os resultados em tempo real. Permitem, também, aumentar a sensibilidade do ensaio, uma vez que é possível detetar defeitos de vários tipos. Porém, necessitam de ser aplicados por um técnico especializado para interpretação dos resultados obtidos no momento.

As técnicas de ultrassons consistem na transmissão de ondas sonoras de frequências iguais ou superiores a $20kHz$, acima da frequência audível pelo ouvido humano. Porém, atualmente em inspeção não destrutiva é mais frequente utilizarem-se ondas de som com frequências dentro de um intervalo de frequências superior, de $0,2MHz$ a $10MHz$ [1]. Pretende-se, por isso, desenvolver um protótipo de inspeção não destrutiva, através de técnicas de ultrassom, estudando quais as sondas mais adequadas à referida inspeção.

Dada a sua natureza, as ondas sonoras não se propagam no vazio. Em contrapartida, podem propagar-se em qualquer meio embora não apresentem em todos eles os mesmos comportamentos. Para cada um deles, o som desloca-se a diferentes velocidades dependendo das características do próprio meio. Para além disso, a velocidade destas ondas também pode variar consoante o tipo de onda que está a ser gerado, uma vez que vai depender diretamente do seu módulo de elasticidade. Posto isto, a velocidade das ondas vai depender também da densidade do meio de propagação e do coeficiente de Poisson. É conveniente mencionar, embora a sua contribuição seja bastante inferior, que a velocidade de propagação das ondas sonoras também é influenciada pela temperatura do material e pelo seu estado de tensão. Portanto, a velocidade das ondas transversais é dada por

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

1. INTRODUÇÃO

e das ondas longitudinais por

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

onde σ é o coeficiente de Poisson, ρ a densidade do meio e E o módulo de elasticidade [1].

A sensibilidade da análise a realizar, ou seja, a menor descontinuidade que se pretende detetar, vai depender da frequência da onda, ou seja, do seu comprimento de onda. Deste modo, um material (meio) que apresente um grão muito fino na sua morfologia e, por conseguinte, menos atenuante, necessitará de ondas com frequências altas. De forma inversa, materiais com um grão mais grosso, mais atenuantes, necessitarão de ondas com frequências baixas. A frequência da onda vai depender da frequência de vibração típica do cristal piezoelétrico, para a qual vai ter grande influência a espessura da peça a analisar e a dimensão típica apresentada pelas suas fissuras internas. Quanto maior for a espessura da peça, menor deve ser a frequência da sonda e vice-versa [12].

Ondas sonoras incidem na superfície da amostra em estudo sendo, em grande parte, transmitidas para o interior do material. Quando as ondas emitidas incidem numa superfície de separação de dois meios com características acústicas diferentes, como uma descontinuidade do material, parte delas, quando não a sua totalidade, é refletida. A sonda de ultrassom que emite as ondas sonoras, recebe as ondas refletidas após o período de emissão [1].

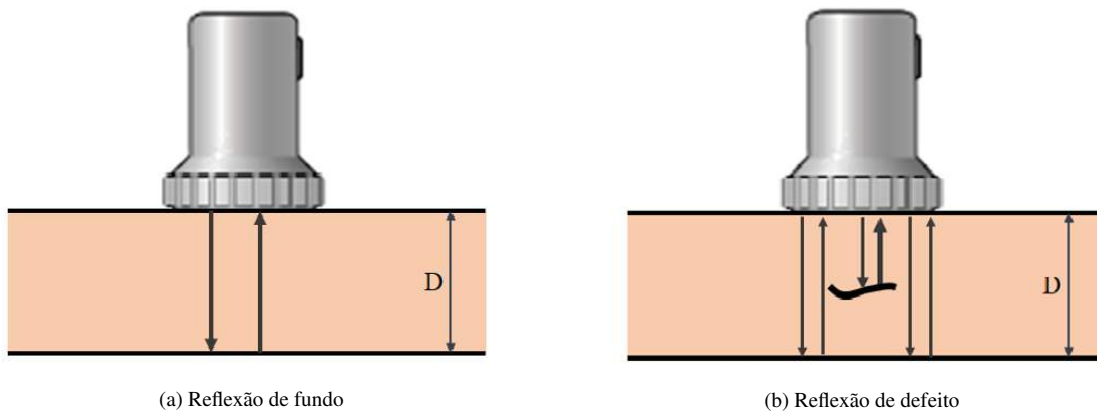


Figura 1.4: Esquemas ilustrativos da reflexão de ondas sonoras num meio.

A partir do tempo de percurso da onda, desde a transmissão até à receção da reflexão da onda emitida, assim como da velocidade de propagação do som no meio e do ângulo de emissão, quando aplicável, é possível determinar a localização da descontinuidade na amostra. Estas ondas são geradas por cristais piezoelétricos redondos, quadrados ou retangulares comumente de dimensões variáveis entre 3 e 30mm, incorporados no interior das sondas. Estes cristais, ou elementos ativos, são excitados através de impulsos elétricos enviados de um gerador de impulsos, provocando a oscilação dos seus átomos em torno das suas posições de equilíbrio. Quando estes elementos ativos recebem a onda refletida, eles vão converter a energia mecânica que esta transporta em energia elétrica que, por sua vez, vai ser enviada para o amplificador do equipamento a fim de ser representada no seu ecrã possibilitando a sua análise. É este sinal que irá fornecer as informações necessárias à determinação da posição e, muitas vezes, do tamanho das descontinuidades internas.

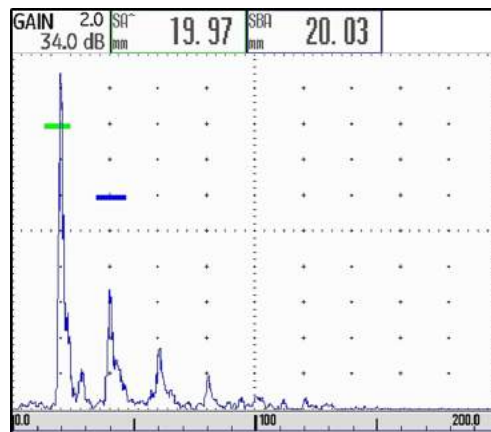


Figura 1.5: Representação A do sinal obtido depois do equipamento receber a reflexão de uma onda.

Na figura 1.5 pode observar-se o sinal obtido quando a sonda recebe uma reflexão da onda que emitiu, normalmente retificado a meia onda, parâmetro manipulado pelo técnico de ultrassons. O equipamento de ultrassons sabe qual o tempo de voo, t , da onda que emitiu e sabe qual a sua velocidade, v , imposta pelo técnico que conhece o material a analisar. Através destes dois parâmetros, o equipamento efetua o cálculo da distância, $d = v \times t$, sendo d a distância percorrida pelo som na peça, o dobro da espessura da mesma, e t o tempo de voo associado a essa distância percorrida. Desta forma, é possível saber a que distância se efetua a reflexão da onda emitida, que corresponde a um pico, ou eco, no sinal observado. O primeiro eco observado é a reflexão de fundo, ou eco de fundo, que corresponde à reflexão da onda na superfície posterior da peça. A profundidade a que esta se dá é dada pelo parâmetro Sa impresso pelo equipamento, que internamente efetua este cálculo a partir da posição a que é posicionada a *gate* correspondente, traço a verde na figura 1.5. O manuseamento das *gates* no equipamento, traços a verde e azul na figura 1.5, é da responsabilidade do técnico que efetua a inspeção e as suas posições são ajustadas para a deteção do pico descrito pelo sinal que se encontra dentro de cada uma. O segundo eco descrito pelo sinal é a reflexão da segunda onda emitida, na qual é posicionada uma outra *gate*, traço a azul na figura 1.5. A partir da posição desta, o equipamento efetua novamente o cálculo da distância e, a ela subtrai a distância calculada para o eco anterior, obtendo a profundidade a que a reflexão da segunda onda se deu, em relação à espessura da peça. Esta distância é impressa através do parâmetro Sba , sendo o eco b o segundo eco do sinal e o eco a o primeiro. Note-se que a velocidade do som é imposta, tal como foi referido anteriormente, e permanece inalterável ao longo da aquisição de dados. As restantes reflexões visíveis no sinal da figura são repetições dos ecos, ou seja, quando a onda incide na sonda, parte dela é absorvida pelo cristal piezoelétrico e a restante parte volta a ser transmitida para a peça. Esta nova reflexão da onda volta a ser detetada pela sonda, agora com menos energia e num ponto afastado do anterior.

A amplitude de cada eco fornece informações relativamente à pressão acústica refletida, pressão exercida pelas ondas que provoca a deformação da ligação interatômica. Para além desta representação do sinal, *A-Scan*, existem equipamentos que permitem obter outros tipos de representações do sinal, as quais se aproximam mais da imagem real da amostra.

1. INTRODUÇÃO

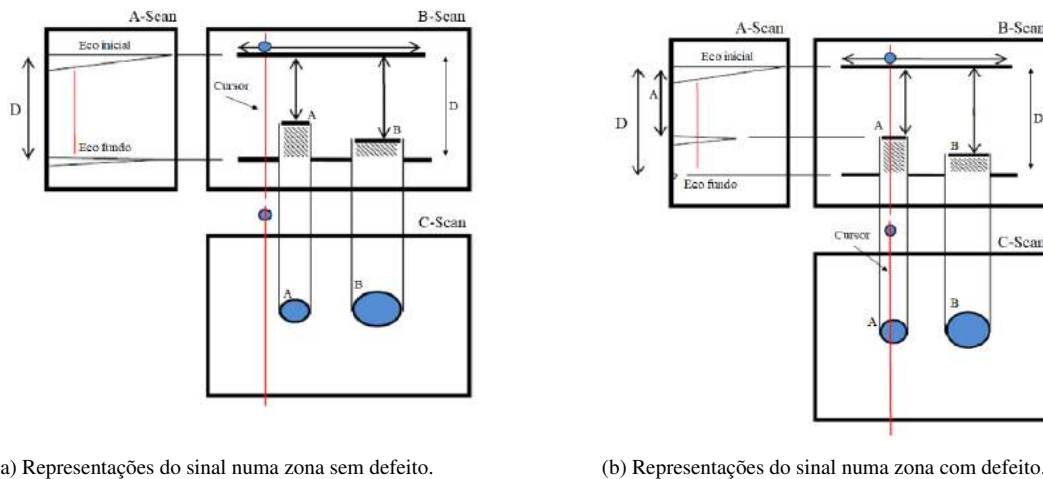


Figura 1.6: Esquema ilustrativo das representações do sinal mais comuns, utilizadas em equipamentos de ultrassom, onde os defeitos representados são furos de fundo plano. Adaptado de [12].

Para além da representação A, as representações de sinal mais comuns são as representações B e C, *B-Scan* e *C-Scan* respectivamente, figura 1.6. A representação B é uma vista transversal da peça que está a ser analisada onde é possível determinar a profundidade e as dimensões lineares aproximadas dos defeitos internos detetados. Cada linha desta representação corresponde a uma representação *A-Scan* diferente. E a representação C é uma vista de topo da peça que está a ser analisada, onde é possível determinar a localização e as dimensões dos defeitos internos detetados. Cada linha da representação C corresponde a uma representação *B-Scan* diferente [12].



Figura 1.7: Sondas de ultrassom: sondas convencionais à direita e sondas *phased array* à esquerda da imagem. Adaptado de [13, 8].

As técnicas ultrassom são aplicadas a partir de dois tipos de sondas: as sondas convencionais e as sondas *phased array*, utilizadas em diferentes aplicações. Com sondas convencionais é possível realizar estudos locais da peça a inspecionar, uma vez que cada sonda tem um feixe de ondas específico e, portanto, um ponto focal específico. Estas sondas são muito utilizadas para medições de espessuras e soldaduras. Para estudos que necessitem da utilização de diferentes ângulos de inspeção é necessária a utilização de várias sondas. Já as sondas *phased array*, apesar de mais dispendiosas que as anteriores, permitem apenas com uma sonda realizar estudos com várias leis focais, tendo feixes com características diferentes, no mesmo local. Portanto, com estas sondas é possível otimizar as inspeções, alterando a forma do feixe e o ponto focal para uma determinada zona de interesse, fazendo incidir aqui a maior parte da sua energia acústica. Apesar de estas últimas serem muito versáteis, existem diversos casos em que a aplicação de uma sonda deste tipo se torna demasiado dispendiosa e não necessária, como é o caso da medição de espessuras [1, 12].

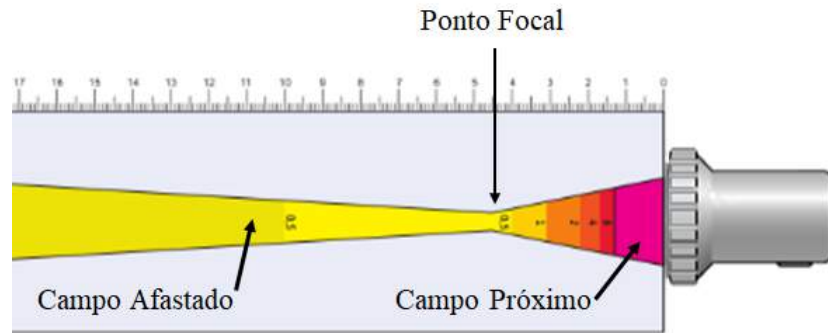


Figura 1.8: Feixe de onda típico de uma sonda convencional monocristal de 2MHz de frequência. Adaptado de catálogo disponível em [13].

O campo próximo é a zona contígua à sonda, onde o feixe converge para um ponto focal sofrendo variações consideráveis de intensidade. Por esta razão, a detecção de descontinuidades é dificultada. A dimensão deste campo depende da frequência e do tamanho do cristal piezoelétrico e, portanto, será tanto menor quanto menor for o diâmetro e a frequência do elemento ativo da sonda. A zona que se estende a seguir ao ponto focal é denominada campo afastado e estende-se pela restante profundidade da peça. Nesta zona, o feixe tem um comportamento divergente e podem ser aplicadas duas leis para interpretação do sinal obtido. Quando a interface encontrada pelo feixe é grande, ou seja, maior que a divergência completa do feixe, é aplicada a lei inversa. Pelo contrário, quando a interface é pequena, ou seja, menor que a divergência completa do feixe, então é aplicada a lei do inverso do quadrado. Um exemplo de grande interface é a face posterior de uma peça do tipo chapa, de faces paralelas. Neste caso, aplicando a lei inversa, cada vez que a distância desta interface é duplicada, a amplitude do eco de fundo é reduzida para metade, espelhando-se numa queda de $6dB$ do sinal. Já um exemplo de interface de pequenas dimensões é qualquer descontinuidade do tipo furo ou poro e, aplicando a lei do inverso do quadrado tem-se que a cada vez que a distância desta duplica, a amplitude do eco correspondente diminui para um quarto do correspondente eco anterior. Este decaimento da amplitude representa uma queda de $12dB$ da amplitude do sinal [12].

As características do feixe da sonda de ultrassons dependem da frequência com que o seu elemento ativo vibra, assim como, do seu diâmetro. Com elevada frequência, as ondas de ultrassons refletem-se mais facilmente em descontinuidades de pequenas dimensões uma vez que têm um comprimento de onda menor. O mesmo acontece quando a sonda é fortemente amortecida uma vez que as ondas geradas vão ser constituídas por impulsos de curta duração. Já quando os elementos ativos são de baixa frequência, as ondas de ultrassons vão penetrar com maior facilidade materiais de maior grão, sendo menos sensíveis a descontinuidades de pequenas dimensões. Ora, se, por sua vez, o cristal for de grandes dimensões, este vai originar um campo próximo muito grande, o que significa um feixe com menor divergência. Desta forma, a probabilidade de detecção de descontinuidades na zona perto da superfície é menor uma vez que um grande campo próximo significa uma grande zona morta do feixe. Sendo a divergência do feixe menor isto leva a que o poder de penetração no material a analisar seja maior. O que não acontece no caso das sondas com elementos ativos de pequenos diâmetros, pois como o campo próximo vai ter menores dimensões, a divergência do feixe vai ser maior reduzindo a capacidade de penetração no material [1, 12].

1. INTRODUÇÃO

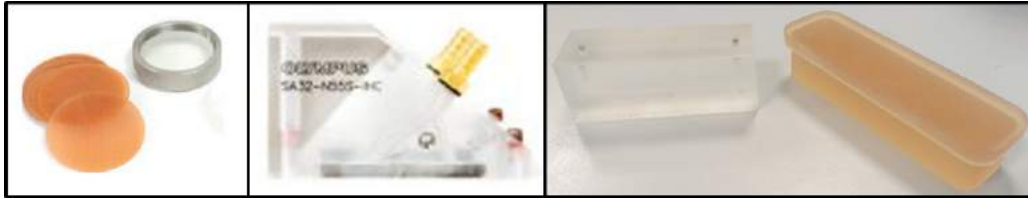


Figura 1.9: Exemplos de calços utilizados em sondas de ultrassons: calços acoplados às sondas à direita e calços adaptáveis às sondas ao centro e esquerda da figura.

As sondas de ultrassons têm, ainda, na sua constituição uma sola de um material de difícil desgaste por forma a proteger o elemento ativo do material com o qual está em contacto, usualmente chamada de calço. Esta sola proporciona o máximo de transmissão. Para além da sola na sonda é possível acoplar à sonda uma sola, ou calço, de maiores dimensões com o intuito de esta conter a zona morta da sonda, quando a sola da própria sonda não é suficiente, aumentando a resolução na zona mais próxima da superfície da amostra. Para além destas características, o calço acoplado à sonda pode servir como um adaptador da sonda a geometrias específicas dos materiais a analisar atuando, diversas vezes, como uma lente, focalizando o feixe emitido. Com a utilização contínua destes calços, o seu material, normalmente Perspex, pode começar a desgastar-se dando origem a reflexões de fundo do sinal emitido. Nestes casos, o calço é aumentado e o feixe emitido pela sonda é forçado a percorrer uma trajetória maior uma vez que a espessura do calço é, também ela, maior, potenciando perdas de sinal no calço [12].

1.4.2.1 Ultrassons Convencionais

As sondas de ultrassons convencionais podem ser classificadas como sondas direitas ou sondas angulares, tendo em conta o ângulo de incidência do som na superfície da amostra a analisar. Desta forma, nas sondas direitas, o som é transmitido na forma de ondas longitudinais perpendiculares à superfície da amostra. Já nas sondas angulares, este vai ser transmitido na forma de ondas transversais fazendo um ângulo maior que zero com a normal à superfície, normalmente de 45° , 60° ou 70° . Neste caso, a onda transversal é gerada a partir da conversão de modo da onda longitudinal emitida pela sonda, na interface sonda+acoplante e superfície. As sondas podem ser dotadas de um ou dois cristais sendo que, no último caso, um cristal é utilizado para emitir e o outro para receber. Em relação às sondas monocristais, as sondas de duplo cristal permitem uma deteção melhorada de descontinuidades na zona próxima da superfície de contacto, uma vez que a zona morta do feixe destas sondas é muito reduzida em comparação com as restantes. Porém, estas sondas têm apenas um ponto focal pois os seus cristais fazem um pequeno ângulo com a normal à superfície e, são muito utilizadas para pequenas espessuras.

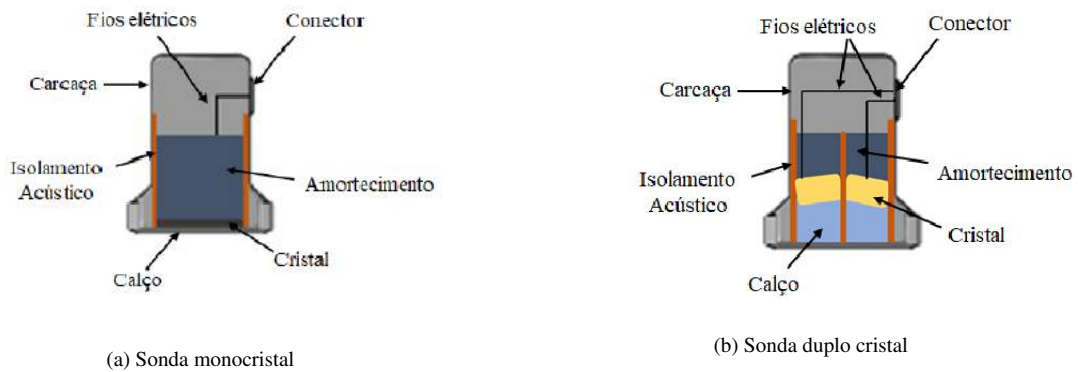


Figura 1.10: Esquemas da constituição de sondas.

Outra forma de classificação das sondas de ultrassom convencionais é tendo em conta a sua forma de acoplamento com a amostra em estudo. As sondas podem ser de contacto, quando o acoplamento é feito através de uma fina camada de um líquido acusticamente condutor, ou um meio viscoso, colocado entre a sonda e a superfície da amostra. Podem ser, ainda, sondas de imersão, quando o som percorre uma determinada distância num líquido, normalmente água, antes de incidir na amostra estando-se perante um acoplamento constante.

O amortecimento do cristal é uma característica própria de cada sonda uma vez que depende do material utilizado para tal. Sendo sempre um material com elevada densidade, este tem como objetivo absorver a energia do cristal de modo a controlar a sua vibração e terá influência na largura do pico descrito pelo sinal recebido e na largura de banda em que o sinal estará situado. O cristal que emite as ondas sonoras, pode ou não ser o cristal que recebe a reflexão das mesmas. Ora, quando isto acontece, no caso da sonda ser de cristal único, o cristal necessita de ficar em repouso durante uns instantes antes de poder receber as ondas refletidas. Para que o movimento de oscilação do cristal seja anulado, estas sondas são dotadas de uma zona de amortecimento em volta do cristal, que vai diminuir o tempo de oscilação do mesmo. Este sistema é denominado sistema de eco pulsado, em que este processo se repete inúmeras vezes enquanto se procede ao varrimento da superfície. Este facto deve-se ao tempo de paragem do cristal ser a duração do impulso. Nestes casos, é alterada a PRF (Taxa de Repetição de Impulsos) do equipamento de modo a alterar o tempo de espera até à geração de um novo impulso. Desta forma, quando o tempo de voo é maior, aumentando a PRF do equipamento é possível enviar um impulso e esperar até à sua reflexão total e, só depois a emitir um novo impulso, simplificando a interpretação do sinal observado. Porém, este tipo de sistema faz com que haja uma zona morta na espessura de material analisado, ou seja, vai existir uma determinada espessura, a partir da superfície do material, em que não vão ser detetadas discontinuidades. Quanto maior for o poder de amortecimento da sondas, maior será a largura de banda por esta produzida pois menor será a duração dos impulsos. Desta forma, haverá um menor poder de penetração porque a distância percorrida pelos impulsos será menor devido à baixa potência do cristal. A sonda terá, porém, uma melhor resolução, uma vez que as impedâncias acústicas do material absorvente e do cristal vão conjugar-se dando origem a um sinal de baixo nível de amplitude.

1. INTRODUÇÃO



Figura 1.11: Feixes de onda típicos de sondas monocristal, à direita e duplo cristal, à esquerda. Adaptado de [9].

O problema imposto pela geração da zona morta é eliminado na utilização de sondas de duplo cristal, uma vez que esta ficará situada na sola das mesmas. Nestes casos, cada cristal exerce apenas uma função, ou seja, um cristal apenas emite feixes e o outro apenas recebe as reflexões dos feixes emitidos. Existe, ainda, uma pequena zona de isolamento acústico entre os cristais, para que a frequência de oscilação de um não interfira com a frequência de oscilação do outro. Estes cristais estão ligeiramente inclinados, fazendo um pequeno ângulo com a normal à superfície de contacto com o material de modo a que a zona morta do feixe tenha menores dimensões, assim como, a distância focal seja mais pequena. É, assim, possível detetar discontinuidades mais próximas da superfície da amostra. [1, 12]

1.4.2.2 Ultrassons *Phased Array*

As sondas *phased array* ou também conhecidas como sondas de multielementos com controlo de fase ou matrizes de fases, são sondas constituídas por vários cristais piezoelétricos isolados acusticamente entre si. Nestes casos, os elementos são controlados independentemente podendo-se enviar impulsos com diferentes fases a elementos diferentes. Enquanto os equipamentos de ultrassons convencionais não são dotados de registo, estes equipamentos são.

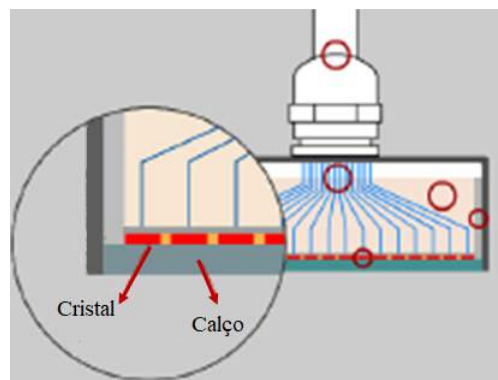


Figura 1.12: Esquema de *phased array*. Adaptado de [8].

Para que os elementos vibrem com diferentes fases, eles são ativados com um determinado atraso em tempo entre si, que vai determinar a distância focal. As ondas geradas por cada um deles vão formar, através da interferência construtiva e destrutiva entre si, uma onda plana com orientação pré-definida. Desta forma, dependendo do atraso e do modo de ativação dos elementos, a frente de onda gerada vai convergir para um ponto focal ao centro da sonda ou mais às suas extremidades. Ou seja, se a ativação dos elementos decorrer da esquerda para a direita, tendo o elemento mais à direita da sonda um atraso maior em relação ao elemento mais à esquerda, a frente de onda gerada vai formar um ângulo para a direita da sonda, obtendo-se um ponto focal também ele mais à sua direita. O mesmo acontece no caso

inverso. Caso sejam os elementos mais ao centro, os últimos a serem ativados, o ponto focal vai situar-se mais ao centro da sonda. Portanto, uma única sonda *phased array* permite escolher o modelo de atraso dos impulsos gerados que melhor se adequa à análise a efetuar, tendo em conta tanto o material da peça como a sua geometria.



Figura 1.13: Esquemas ilustrativos da formação de feixes orientados. Adaptado de [12].

Desta forma é possível, durante uma inspeção, variar a posição dos pontos focais do feixe emitido em diversas profundidades ao longo do material em estudo. Tal como a focalização destas sondas é dinâmica, o ângulo com que o feixe incide no material pode também ele variar sem que seja necessária a mudança de posição da sonda em relação à peça. Por outro lado, este facto vai implicar sondas de maiores dimensões o que leva à utilização de material acoplante entre a sonda e a peça em maiores quantidades, em relação à utilização de sondas convencionais. Será necessário, ainda, que o técnico de ultrassons garanta a existência de material acoplante de forma homogênea em toda a superfície da sonda. Esta redução da necessidade contínua da movimentação da sonda ao longo da superfície em análise, permite um aumento de confiança no dimensionamento de discontinuidades detetadas. Portanto, quando perante geometrias complexas ou peças que impliquem uma análise com feixes de ultrassons de diversos ângulos ou distâncias focais, o técnico de inspeção pode utilizar uma única sonda, *phased array*, no lugar de uma gama variada de sondas convencionais.

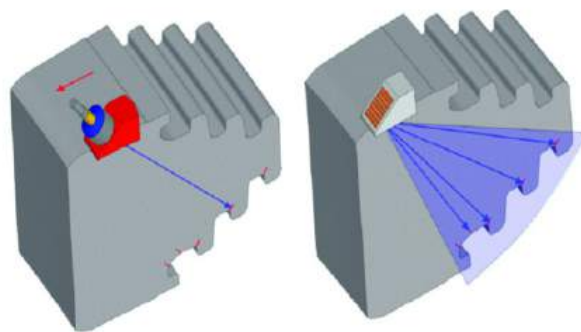


Figura 1.14: Esquema dos feixes típicos de sondas de *phased array* em comparação com sondas convencionais angulares. Adaptado de [12].

Assim, uma sonda *phased array* disponibiliza uma ampla gama de ângulos de incidência, entre os 0° até ângulos além de 70°, tal como uma vasta largura de banda do feixe emitido. Permitem, ainda, a conversão dos modos das ondas geradas, longitudinal para transversal, conferindo-lhe uma maior sensibilidade e uma relação sinal-ruído melhorada. Esta última melhoria permite o estudo, com estas técnicas, de materiais com elevado ruído como é o caso de materiais constituídos por grãos grossos. Devido às suas grandes dimensões, estes grãos vão obrigar as ondas de ultrassons a dispersarem-se pelo material, desviando e reduzindo as suas trajetórias. A partir da capacidade de focalização do feixe, estas sondas permitem a receção de ecos de discontinuidades de maior amplitude. [12, 1]

Capítulo 2

Desenvolvimento

2.1 Análise morfológica, micro estrutural e química

2.1.1 Microscopia Ótica

Dos provetes escolhidos para o efeito, foi devidamente escolhida uma face lateral obtida a partir de um corte transversal. Esta face foi muito bem polida de modo a que os riscos resultantes do corte da peça fossem reduzidos ao máximo. O equipamento utilizado era o Microscópio Ótico Zeiss.

Durante a análise das amostras foram retiradas fotografias de várias zonas do corte transversal das mesmas. As fotografias retiradas foram posteriormente analisadas com software AxioVision que permitia o dimensionamento dos grãos de cada amostra. Os resultados obtidos a partir deste estudo foram impressos num gráfico para melhor interpretação dos mesmos.

2.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento e Espectroscopia de Dispersão em Energia

O equipamento utilizado para a análise micro estrutural foi o microscópio JOEL JSM-6500F Fiel Emission Scanning Electron Microscope com um espetrocópio EDS Oxford Instruments X-Max^N acoplado. As técnicas utilizadas nesta análise foram a deteção de eletrões secundários e espectroscopia de dispersão em energia, para determinação dos elementos químicos presentes na constituição da amostra.

Este método de inspeção é um método semi-quantitativo. Por este motivo, este método não é indicado para fazer a quantificação de elementos leves como o Carbono e, é necessário ter em conta que este elemento está presente em todos os materiais e a pedra não é exceção. Desta forma, a análise realizada à amostra terá sempre em conta as contagens de Carbono, porém, na determinação da proporção dos elementos que constituem a superfície da amostra, este elemento não será tido em conta uma vez que induziria em erro a determinação das suas proporções. Cada provete analisado foi sujeito a uma preparação prévia antes de poder ser introduzido na câmara do microscópio, de modo a que as imagens produzidas apresentassem melhor resolução e que estas fossem o mais fiéis possível à real estrutura da superfície. Esta preparação consiste na deposição de uma fina camada de um metal, neste caso ouro, na superfície a analisar para que esta se torne mais condutora. Esta deposição tem como objetivo facilitar a dispersão dos eletrões. Posto esta deposição, a amostra é colocada num suporte de amostras e são feitas pontes entre a amostra e o suporte de modo a evitar zonas eletricamente carregadas durante o varrimento da superfície e o consequente desenvolvimento de potenciais elétricos que causam defeitos nas imagens produzidas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.2 Ensaios Não Destrutivos

2.2.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X

Foi realizado um estudo com técnicas de Raios-X, com o equipamento Andrex, às amostras em laboratório. A partir deste foi possível estudar o comportamento do material aos raios-X e visualizar alguns defeitos.

Para a realização destes ensaios é necessário o conhecimento prévio da densidade do material a radiografar pois, segundo a norma a radiografia é aceite mediante a visualização de determinado número de fios indicadores. Estes fios devem ser do mesmo material a radiografar e encontram-se em indicadores de qualidade de imagem, os IQI (*Image Quality Indicator*). Dada a inexistência de um IQI deste tipo de material em laboratório e mediante uma pesquisa prévia das suas características, foi descoberto que a densidade da pedra é muito semelhante à densidade do alumínio. Posto isto, o IQI utilizado nas radiografias realizadas à pedra foi o IQI do alumínio. Para além deste parâmetro é necessário medir a densidade do filme revelado e a respetiva verificação do valor obtido estar dentro de intervalos determinados nas normas de inspeção por Raios-X.

Seguindo as normas para a realização destes ensaios, a amostra foi devidamente posicionada no interior do *bunker* com a fonte de radiação. A fonte foi ativada após a especificação dos devidos parâmetros necessários ao seu funcionamento: corrente, em *mA*; energia, em *keV* e tempo de exposição, em minutos.

A partir da comparação desta técnica com a técnica de ultrassons será possível determinar se todos os defeitos contidos em cada amostra são visíveis a partir deste tipo de inspeção realizada.

2.2.2 Ultrassons Convencionais

Numa primeira instância deste estudo, foram analisados os sinais obtidos com sondas de diferentes frequências. A partir da comparação dos sinais obtidos foi possível determinar qual a sonda que permite obter melhores resultados de inspeção. Com a sonda escolhida foi analisado o sinal obtido nas várias amostras de espessura conhecida, 20mm, determinando a velocidade em cada uma delas. O equipamento de ultrassons utilizado, para além das sondas, foi o USM36 GE Inspection Technologies.

Foi possível calibrar a sonda escolhida para três amostras visualmente diferentes obtendo, para cada uma, uma velocidade diferente para o som. Cada amostra foi analisada com a respetiva calibração, realizada num provete sem defeitos conhecidos, e foi possível observar o comportamento ao longo de toda a superfície.

Outras amostras foram analisadas e, para tal, procedeu-se ao estudo do sinal de resposta obtido na utilização de cada uma das calibrações já estudadas. Foi escolhida a calibração que apresentava um sinal de resposta com menor ruído, que permitisse a observação da atenuação do som e cujos valores da profundidade do feixe e do cálculo da distância à superfície de contacto em cada amostra fossem os mais próximo possível dos valores reais. Uma das amostras continha defeitos artificiais que foram exaustivamente estudados, de modo a perceber quais os menores defeitos detetáveis.

As sondas angulares são indicadas para a deteção de defeitos com orientações transversais à peça. Nestes casos, o som percorre distâncias maiores no material ficando sujeito à atenuação do mesmo.

As sondas de duplo cristal focalizadas, cujos cristais fazem um pequeno ângulo com a normal à superfície da amostra, e têm cristais de menor diâmetro não foram incluídas no âmbito deste trabalho. Por serem focalizadas estas sondas têm um ponto focal mais estreito que as restantes sondas, o que leva a que a área de incidência seja mais pequena. Este facto melhora a resolução do sinal mas aumenta o tempo necessário ao varrimento de grandes áreas. Isto torna-se controverso pois o objetivo deste trabalho

é adaptar o método de inspeção a peças de grandes dimensões em ambientes industriais, onde o tempo necessário à inspeção é um fator crítico para a competitividade das empresas.

2.2.3 Ultrassons *Phased Array*

Para complementar o estudo deste material com técnicas de ultrassons, foi estudado o comportamento do sinal obtido com sondas *phased array* de diferentes frequências: 1MHz e 5MHz. O equipamento de ultrassons utilizado foi o OmniScan MX2 Olympus.

A sonda de 5MHz, é uma sonda *Near Wall*, ou seja, é uma sonda cujos limites dimensionais se encontram muito próximos dos limites dos elementos que a compõem, fazendo com que esta tenha menores dimensões em relação à sonda de 1MHz. Por ser constituídas por cristais de frequência típica menor, estes vão ter menor dimensão que os cristais da sonda de frequência de 1MHz, pois quanto menor for a frequência do cristal piezoelétrico maior este vai ser. Este facto possibilita o varrimento até aos limites da amostra em estudo, não deixando áreas mortas. Esta é uma sonda muito utilizada em compósitos e é utilizada com um calço de 35mm, que permite eliminar a zona morta da amostra. Isto permite realizar a inspeção da espessura completa da amostra, uma vez que a zona morta do feixe emitido fica localizada no calço. A espessura fica localizada na zona visível do feixe emitido.

Para as duas sondas utilizadas foi estudado o comportamento do sinal recebido a partir de feixes emitidos com grupos de elementos do mesmo tamanho, 4 elementos ativos de cada vez. Da comparação dos sinais obtidos com ambas as sondas foi escolhida a mais indicada para prosseguir com os estudos na amostra. Foram, depois, comparadas as aquisições obtidas com grupos de elementos diferentes, com a mesma sonda, analisando em qual dos casos era obtido um sinal com melhor resolução.

Toda a superfície da amostra foi analisada, permitindo a deteção de descontinuidades até então desconhecidas e a análise de entalhes feitos na superfície posterior da amostra. A análise das descontinuidades desconhecidas foi comparada com a análise das mesmas com técnicas de Raios-X. E da análise aos entalhes foi estudado o sinal obtido e o facto de receção ou não do sinal.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

3.1 Análise morfológica, micro estrutural e química

3.1.1 Microscopia Ótica

A microscopia ótica permitiu o estudo da distribuição dos grãos constituintes de cada amostra, assim como, a sua dimensão e o comportamento das respectivas fronteiras de grão. Desta forma, será possível comparar as diferentes amostras e identificar diferenças entre elas, caso as haja, e construir uma base de conhecimento do material para a interpretação de resultados obtidos posteriormente. Desta forma, foram analisadas três amostras e para cada uma delas foram retiradas dez fotografias de locais diferentes da superfície analisada. Destas dez fotografias de cada amostra foi escolhida uma fotografia referente a cada uma, representadas nas figuras seguintes. Note-se que as fotografias a seguir representadas não são fotografias tipo, uma vez que diferentes zonas apresentam diferentes granulometrias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

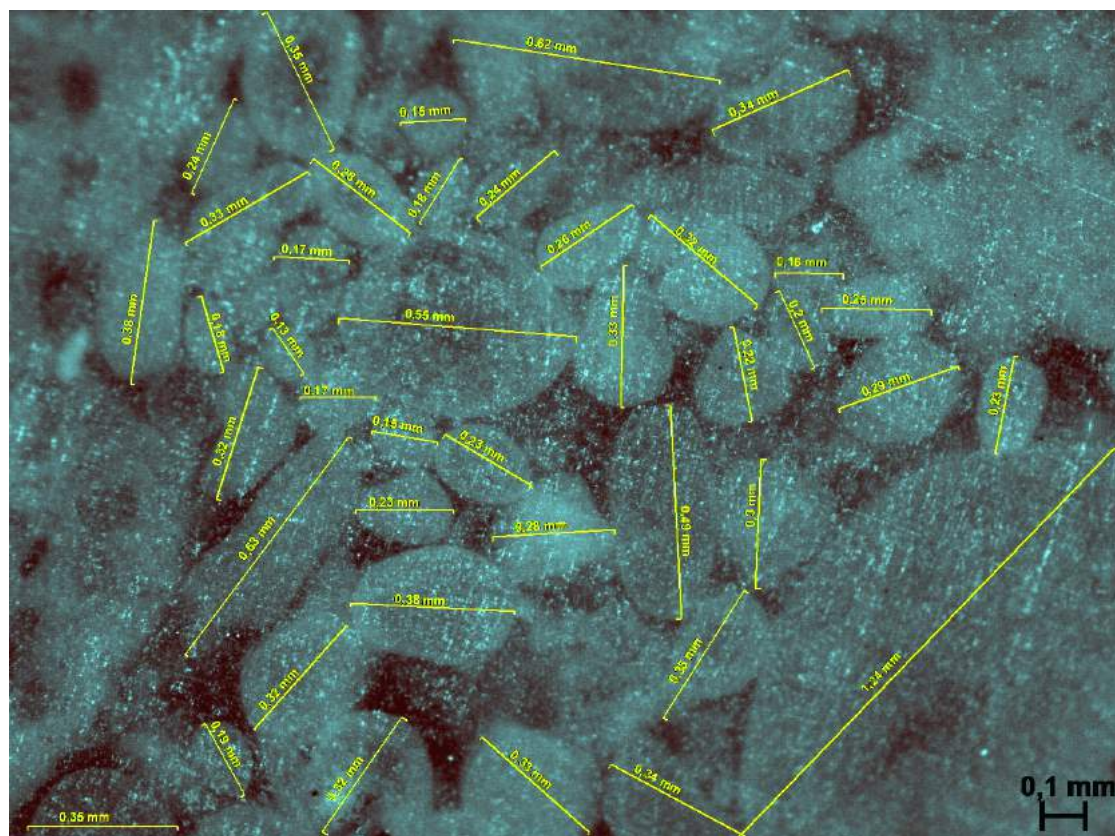


Figura 3.1: Fotografia obtida a partir do microscópio ótico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-02.

3.1 Análise morfológica, micro estrutural e química

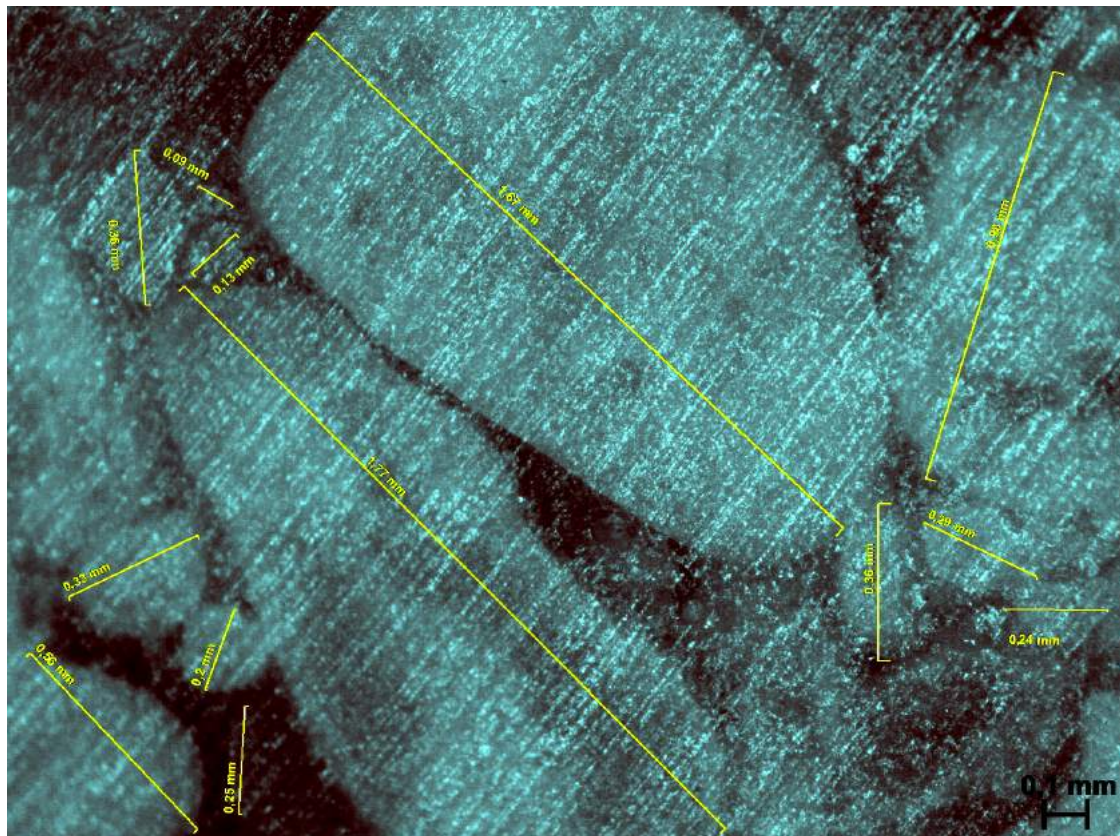


Figura 3.2: Fotografia obtida a partir do microscópio óptico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-03.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

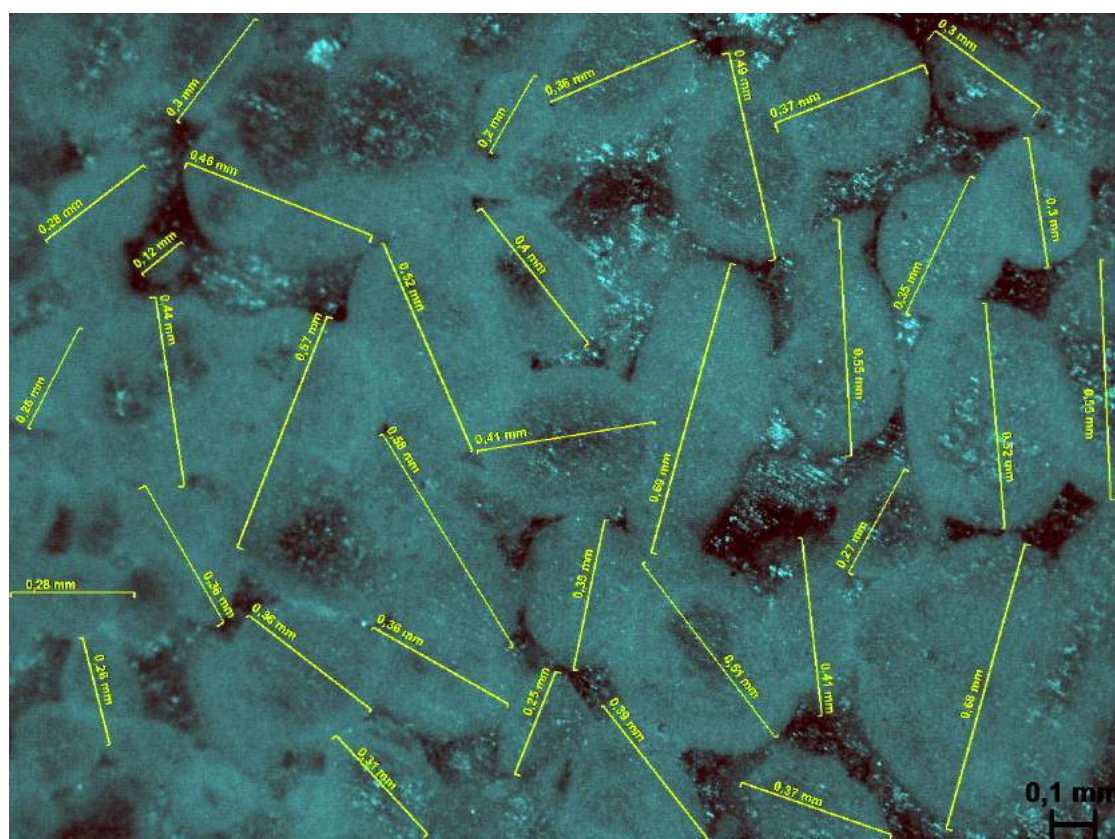


Figura 3.3: Fotografia obtida a partir do microscópio ótico com uma ampliação de 50x. Fotografia de um provete da amostra L-04.

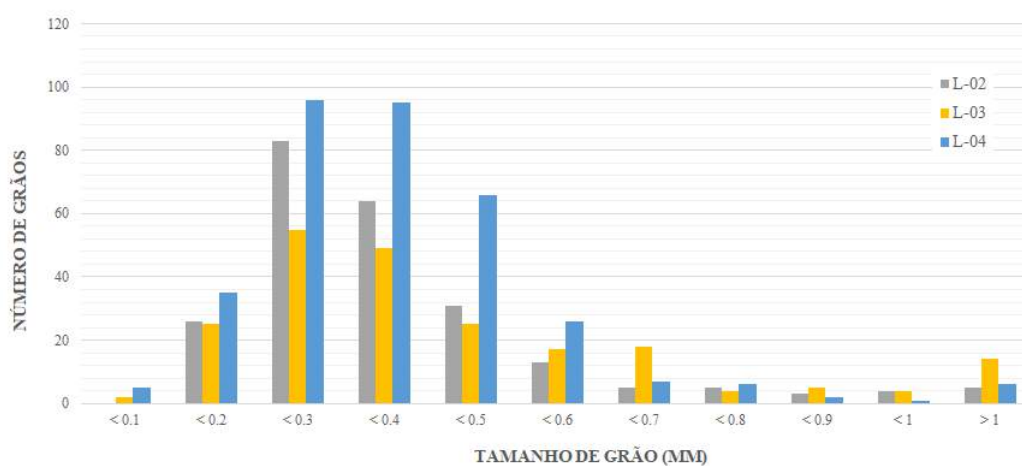


Figura 3.4: Gráfico das medições realizadas aos grãos de cada amostra em função da quantidade de grãos em intervalos de 0,1mm.

Nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3 estão representadas uma fotografia retirada a cada amostra, escolhida entre as dez fotografias retiradas a diferentes zonas da superfície de cada amostra. É possível observar-se que a quantidade de grãos é visivelmente diferente, tendo em conta sempre que as fotografias apresentadas não representam a granulometria típica das amostras. Como se pode verificar, apesar de todas as amostras serem do mesmo tipo de pedra, pedra calcária, estas apresentam uma morfologia diferente, pois as fronteiras de grão têm comportamentos diferentes. Note-se que todas as fotografias foram recolhidas

3.1 Análise morfológica, micro estrutural e química

com a mesma ampliação da objetiva do microscópio, 55x, para efeitos de comparação entre os diferentes provetes analisados. O gráfico representado na figura 3.4 exprime o comportamento dos grãos de cada amostra analisada, dados retirados das dez fotografias retiradas às três amostras. Da análise deste gráfico é possível observar que as três amostras analisadas exprimem o mesmo comportamento relativamente à dimensão dos grãos que as constituem, descrevendo uma distribuição normal de resultados. Desta amostragem de resultados é possível determinar que as granulometrias típicas apresentadas, referentes às três amostras analisadas, são semelhantes. Mais se pode acrescentar, a partir da observação das figuras 3.1, 3.2 e 3.3, que as fronteiras de grão das diferentes amostras, apresentam diferenças entre si, sendo para umas amostras mais bem definidas do que para outras.

3.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento e Espectroscopia de Dispersão em Energia

A análise micro estrutural foi realizada com o intuito de estudo da quantidade e distribuição dos poros na superfície das amostras. Já a análise química tinha como objetivo a determinação dos elementos químicos em cada amostra. A seguir apresentam-se os resultados obtidos em ambas as análises.

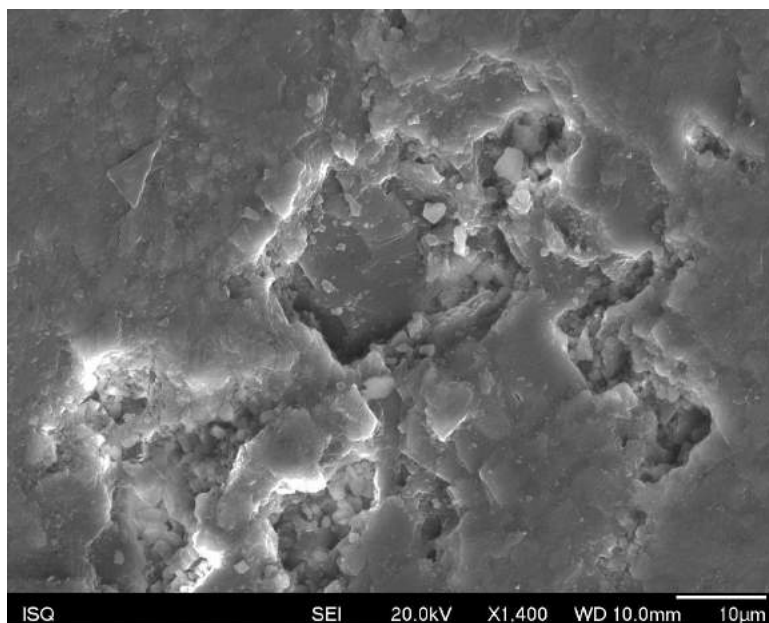


Figura 3.5: Imagem MEV de um poro, da superfície da amostra L-04, analisado com ampliação de 1400x, da qual foram retirados vários espectros para análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

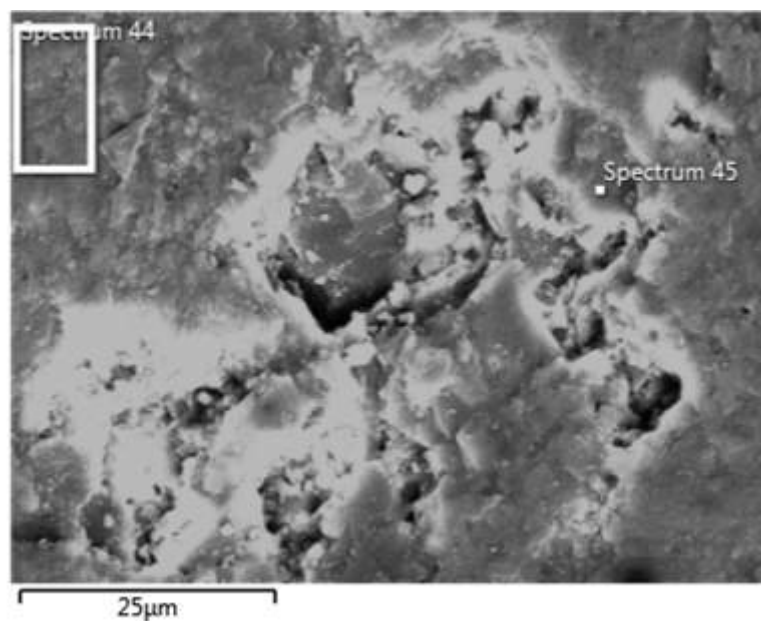


Figura 3.6: Imagem representativa da zona da superfície representada na figura anterior, com identificação dos locais onde foram retirados os espectros para análise dos elementos presentes em cada local.

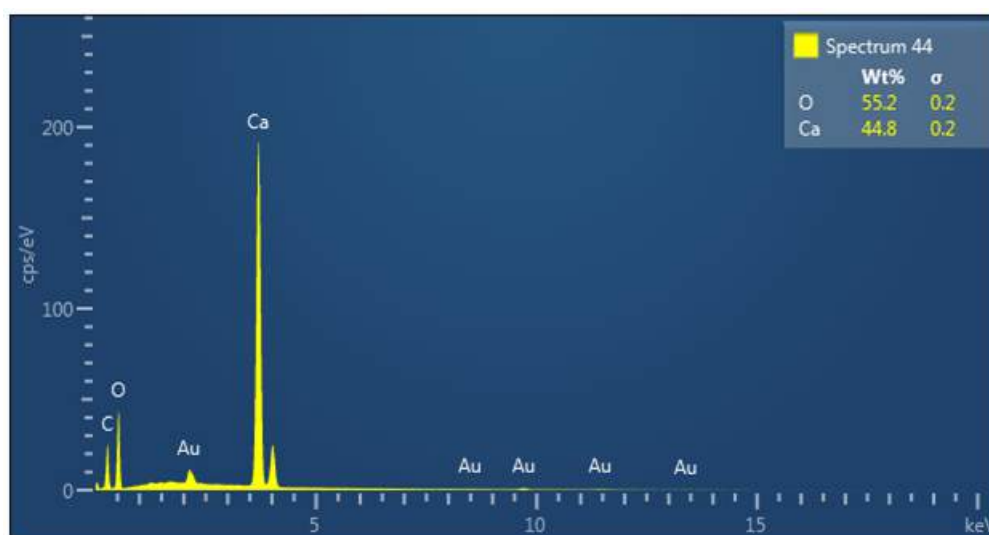


Figura 3.7: Espectro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 44 na Figura 3.6.

3.1 Análise morfológica, micro estrutural e química

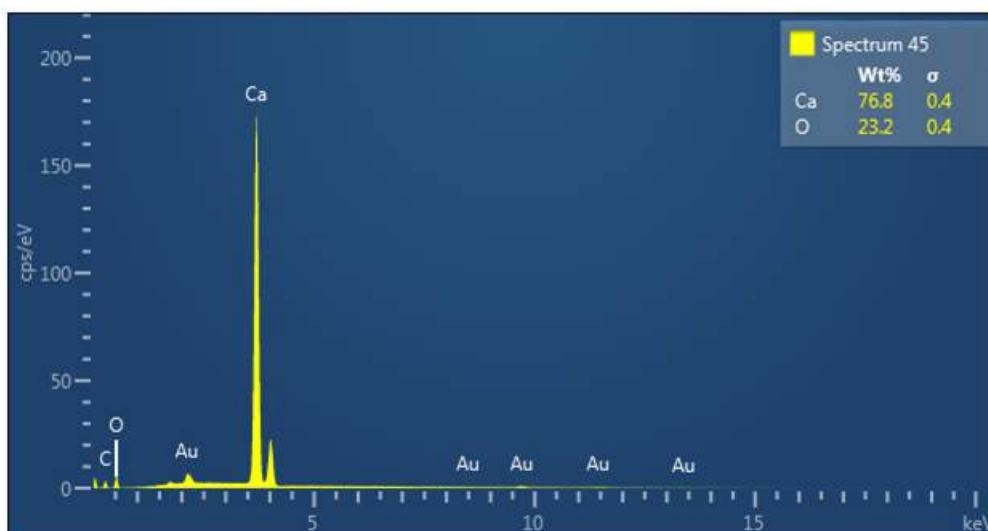


Figura 3.8: Espectro de contagens em função da energia dos eletrões, correspondente ao local indicado como espectro 45 na Figura 3.6.

O poro representado na figura 3.5 foi analisado, tendo sido retirados dois espectros de contagens de eletrões em dois locais diferentes, representados nas figuras 3.7 e 3.8. Da análise dos espectros, é possível determinar que diferentes locais numa pequena zona da superfície da amostra apresentam na sua composição química os mesmos dois elementos, em quantidades muito semelhantes. Os elementos químicos presentes na superfície da amostra analisada são, então, o Oxigénio e o Cálcio. No espectro da figura 3.8, o elemento presente em maior proporção é o Cálcio havendo, neste caso, uma diferença muito grande entre as proporções determinadas. Esta diferença nas proporções dos elementos pode dever-se ao facto de que o local pontual de onde foi retirado o espectro poder ser um depósito de Cálcio dentro do poro, uma vez que o equipamento teve dificuldade em fazer o vácuo necessário para a obtenção dos dados necessários ao estudo da amostra.

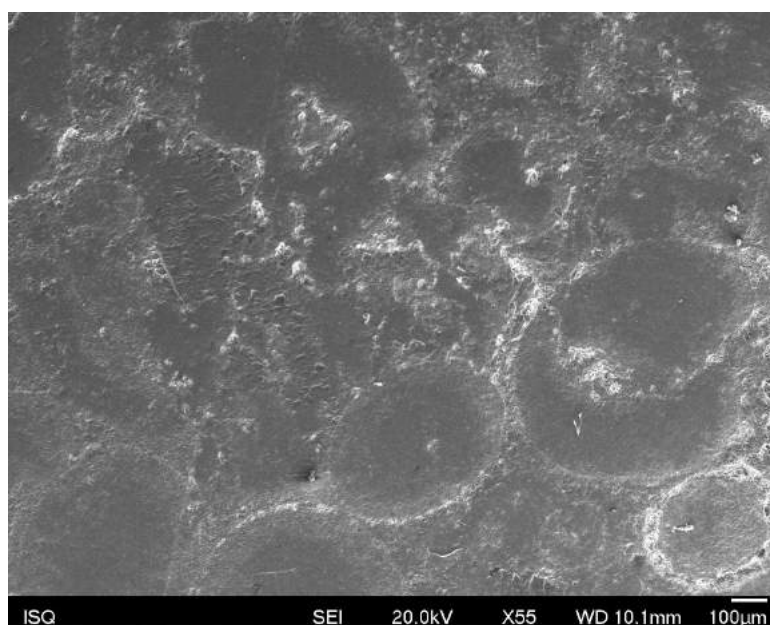


Figura 3.9: Imagem representativa da zona da superfície com ampliação de 55x, da qual foram retirados vários espectros para análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

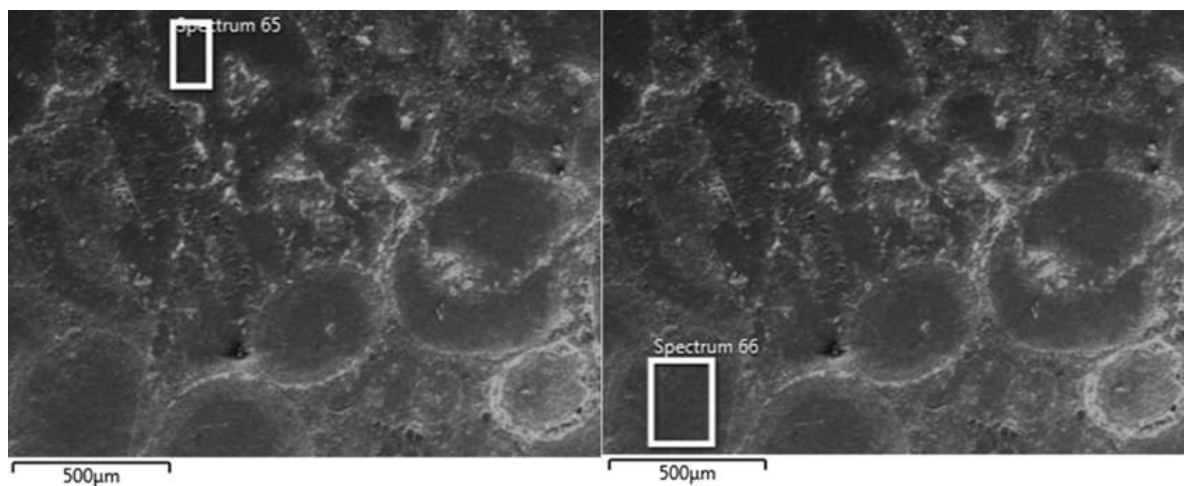


Figura 3.10: Imagem representativa da zona da superfície representada na figura anterior, com identificação dos locais onde foram retirados os espectros para análise dos elementos presentes em cada local.

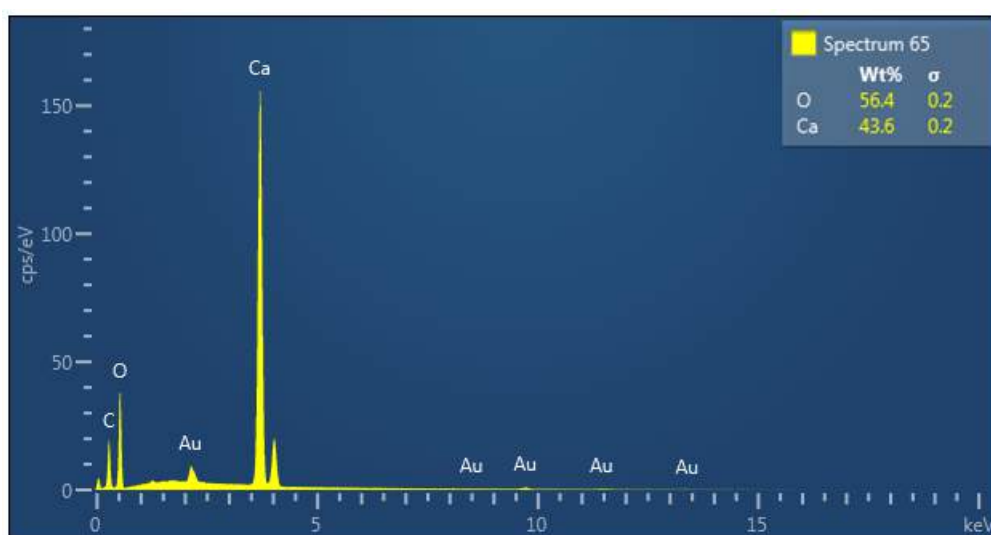


Figura 3.11: Espectro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 65 na Figura 3.10.

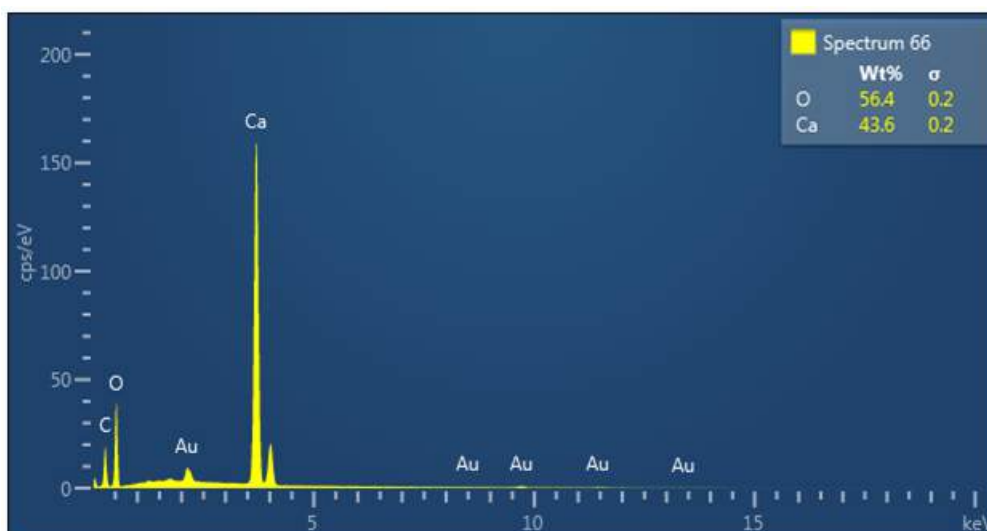


Figura 3.12: Espectro de contagens em função da energia dos elétrons, correspondente ao local indicado como espectro 66 na Figura 3.11.

Na figura 3.9 está representado um local de um provete do qual foram retirados dois espectros de contagens de elétrons, assinalados na figura 3.10. Foram, então analisados os espectros obtidos a partir de dois grãos diferentes e podem ser observados nas figuras 3.11 e 3.12. Da análise destes gráficos de contagens pode afirmar-se que dois locais diferentes, grãos neste caso, são constituídos exatamente pelos mesmos elementos químicos em proporções muito semelhantes.

Da análise micro estrutural de várias amostras foi possível determinar que os elementos químicos que as constituem são o Oxigênio e o Cálcio. Embora, nem sempre determinados nas mesmas proporções, para diferentes amostras, estes são os elementos químicos predominantes em todas as amostras analisadas.

3.2 Ensaios Destrutivos

3.2.1 Ensaios Mecânicos

Devido a avarias nos equipamentos utilizados na realização deste tipo de ensaios, não foi possível a sua realização nas amostras em estudo. Porém, o objetivo destes, para além da análise das propriedades mecânicas do material, era a determinação da velocidade a partir da sua equação característica. Desta forma, seria possível a comparação com os valores obtidos por ultrassons, apresentados mais à frente.

3.3 Ensaios Não Destrutivos

3.3.1 Radiografia Industrial utilizando Raios-X

A radiografia industrial utilizando Raios-X foi realizada com o intuito do estudo da deteção de descontinuidades internas nas amostras. Apresenta-se a seguir os resultados obtidos com esta técnica de inspeção não destrutiva e a respetiva discussão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 3.13: Radiografia realizada à amostra L-001.



Figura 3.14: Radiografia realizada à amostra L-002.



Figura 3.15: Radiografia realizada à amostra L-003.

Na figura 3.13, podem ser observados os entalhes feitos na superfície inferior da amostra, assim como, na figura 3.14 pode ser observado o defeito superficial passante que a mesma possui. Já na figura 3.15, pode ser observada uma amostra sem defeitos superficiais. Mais se pode observar que a amostra não apresenta nenhum outro defeito desconhecido até ao momento da inspeção visual.



Figura 3.16: Radiografia realizada a descontinuidade interna detetada com técnicas de *phased array*, na amostra L-001.

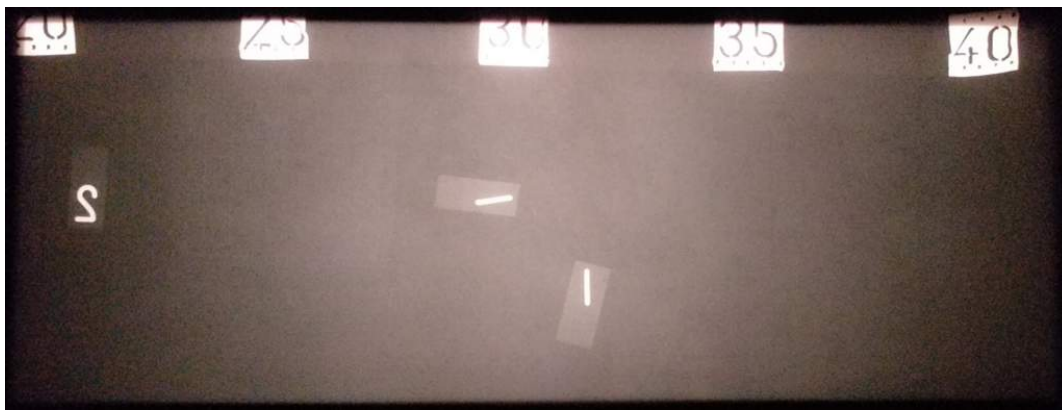


Figura 3.17: Radiografia realizada outra descontinuidade interna detetada com técnicas de *phased array*, na amostra L-001.



Figura 3.18: Fotografia de detalhe das descontinuidades dos provetes mostrando as diferentes orientações para radiografia: vertical à fonte à esquerda e horizontal à fonte à direita.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 3.19: Fotografia de detalhe do interior da descontinuidade de um dos provetes da figura 3.18.



Figura 3.20: Radiografia realizada a provetes com descontinuidades naturais de grandes dimensões orientadas verticalmente com a fonte de Raios-X.



Figura 3.21: Radiografia realizada a provetes com descontinuidades naturais de grandes dimensões orientadas horizontalmente com a fonte de Raios-X.

Foram detetadas, com técnicas de ultrassom *phased array*, descontinuidades de dimensões consideráveis e cujo sinal de ultrassom apresentava um comportamento diferente do apresentado perante outras descontinuidades detetadas. Deste modo, foram realizadas radiografias aos locais das respeti-

vas discontinuidades, devidamente assinaladas, figuras 3.16 e 3.17. Como se pode observar, ambas as discontinuidades assinaladas não são visíveis nas respectivas radiografias. Com o objetivo de estudar o porquê destas discontinuidades detetadas serem visíveis apenas com técnicas de ultrassons, foram realizadas radiografias a dois provetes que continham discontinuidades naturais interiores, visíveis nas suas faces laterais devido às suas reduzidas dimensões, figura 3.18. Da análise das radiografias realizadas a estes provetes, figuras 3.20 e 3.21, retirou-se que a visibilidade da discontinuidade não sempre clara, dependendo da sua orientação. As discontinuidades neste tipo de material têm normalmente uma espessura muito reduzida quando comparadas com a espessura da amostra, o que se pode verificar na figura 3.18. Portanto, quando a radiação incide na amostra, encontrando uma discontinuidade orientada horizontalmente com a fonte, vai continuar a sua trajetória sem qualquer alteração, perdendo muito pouca ou nenhuma intensidade. Assim, a radiação que chega ao filme, no local da discontinuidade, é praticamente a mesma radiação que chega ao filme nos locais onde não existem discontinuidades. É por esta razão que, nestes casos, as discontinuidades não são visíveis como será o caso das discontinuidades assinaladas nas figuras 3.16 e 3.17. Já, quando a discontinuidade está orientada verticalmente com a fonte é possível observar na radiografia. Isto acontece porque uma vez que a radiação encontra a discontinuidade, vai percorrer uma distância mensurável dentro desta. Posto isto, esta radiação vai chegar em muito mais quantidade do que a radiação que não encontra nenhuma discontinuidade, como se pode comprovar observando a figura 3.20.

3.3.2 Ultrassons Convencionais

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos a partir da utilização das técnicas não destrutivas por ultrassons utilizando sondas convencionais, numa primeira fase com diferentes frequências e posteriormente com a sonda mais indicada para a deteção de discontinuidades internas nas amostras.

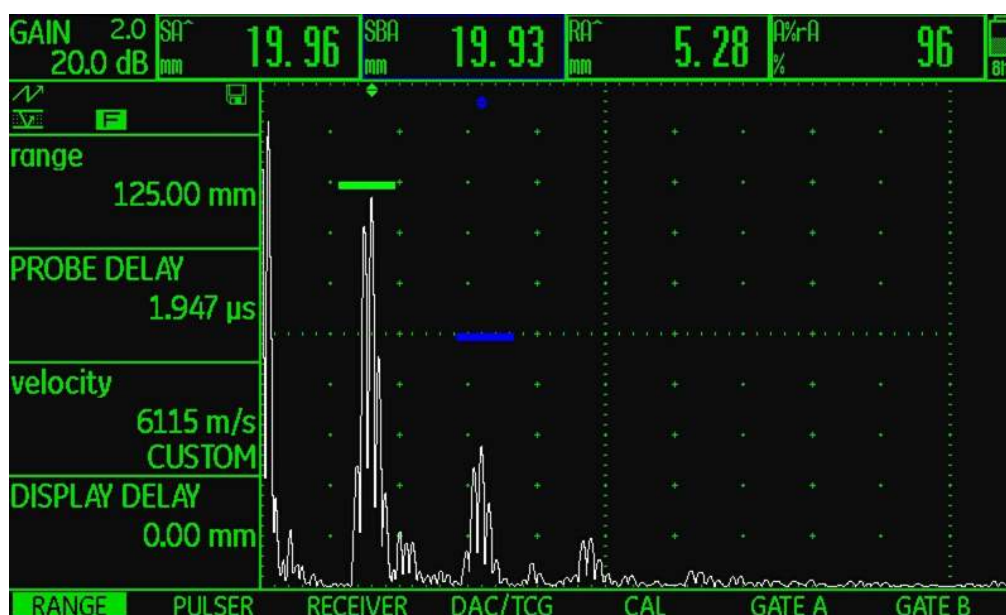


Figura 3.22: Sinal de atenuação obtido com sonda de 1MHz, K1SM com um cristal de diâmetro 28mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

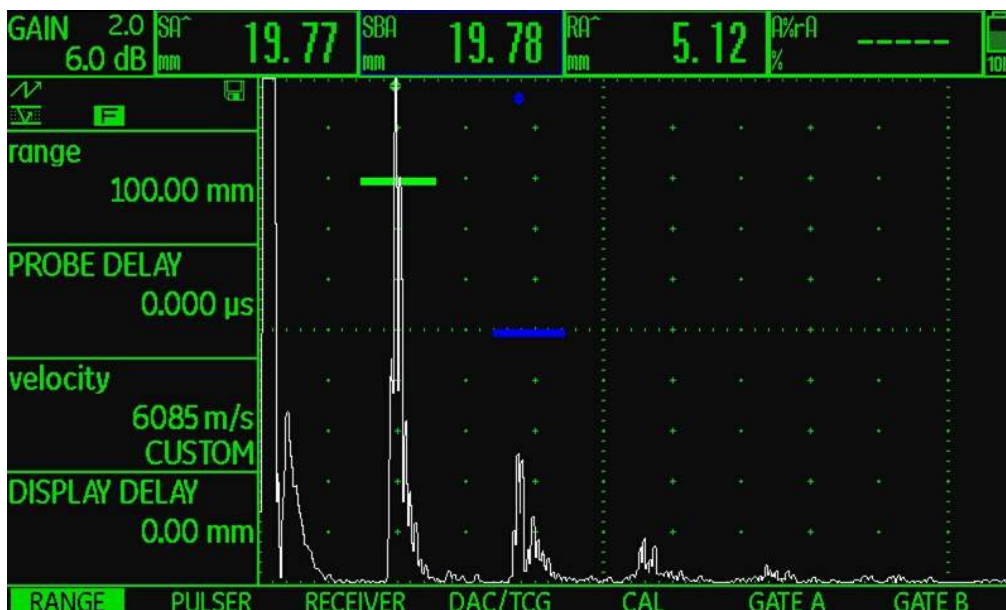


Figura 3.23: Sinal de atenuação obtido com sonda de 2MHz, G2ND com um cristal de diâmetro 28mm.

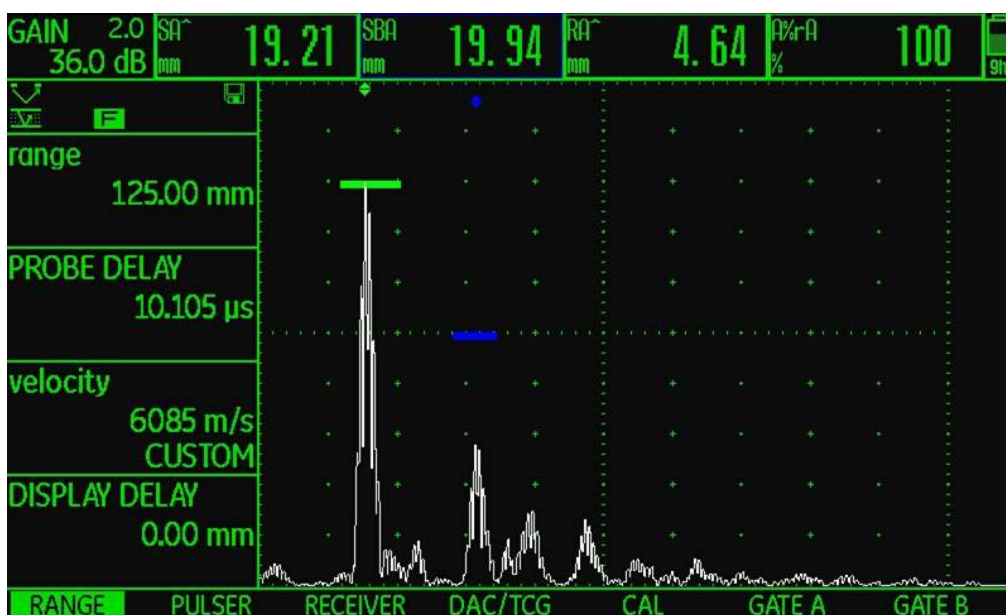


Figura 3.24: Sinal de atenuação obtido com sonda de 2MHz, MSEB 2 com dois cristais de diâmetro de 11mm cada.

Quando analisado o sinal de atenuação obtido no mesmo local da mesma amostra, com sondas de diferentes frequências, figuras 3.22 e 3.23, é possível de imediato fazer algumas comparações. O sinal obtido a partir da sonda de 2MHz, figura 3.23, apresenta mais picos, ecos. Estes estão melhor definidos e apresentam maior amplitude do que os picos descritos pelo sinal obtido com a sonda de 1MHz, figura 3.22, uma vez que com esta sonda foi necessário aumentar o ganho do equipamento de modo a ser possível visualizar o sinal nas mesmas condições do observado na figura 3.23. Por estes motivos, a sonda que apresenta melhor resposta é a sonda com frequência de 2MHz.

Após estudada a frequência mais indicada para a obtenção do melhor sinal de atenuação, foi estudada a hipótese da utilização de uma sonda de apenas um cristal ou de duplo cristal. Analisando os sinais obtidos na mesma zona da mesma amostra, figuras 3.23 e 3.24, é possível observar de imediato a diferença na forma que ambos os sinais descrevem os seus picos. Apesar de com a sonda de cristal

único, figura 3.23, ser possível obter um sinal com maior amplitude e cuja atenuação no material é bem definida, com a sonda de duplo cristal, figura 3.24, é possível determinar melhor a espessura da amostra. Este é um parâmetro muito importante para o presente trabalho em desenvolvimento, uma vez que quanto próxima da espessura real for a espessura medida, mais próxima será a profundidade das descontinuidades internas detetadas. Por este motivo, foi escolhida a sonda de duplo cristal para proceder o estudo em desenvolvimento.

Escolhida a sonda mais adequada para o objetivo pretendido, procedeu-se à análise do comportamento do sinal de resposta dos ultrassons na presença, ou não, de descontinuidades. Para tal, foram analisados provetes de dimensões reduzidas, apenas a largura necessária para cobrir o cristal da sonda utilizada, de cada amostra. Cada provete apresentava as dimensões de 20x20x40 mm, tendo sido retirados cinco provetes de cada amostra, assim como, um provete com maiores dimensões, 20x30x50mm, utilizados na calibração da sonda. A sonda foi calibrada nos provetes maiores de cada amostra o que conferiu uma maior fiabilidade aos resultados obtidos. Os provetes de menores dimensões foram sujeitos a ensaios de ultrassons convencionais de modo a perceber o comportamento do som em pequenas áreas na presença, ou não, de descontinuidades. Desta forma, foi possível estudar melhor o comportamento do sinal, uma vez que a existência de descontinuidades em peças deste tipo de material com dimensões reduzidas são facilmente visíveis à vista desarmada pois são, salvo raros casos, sempre passantes. Os provetes de calibração não apresentavam nenhuma descontinuidade. Por esta razão, é possível medir a distância entre a superfície de contacto com a sonda e a descontinuidades do material, caso a haja, e comparar com a distância medida pelo equipamento de ultrassons. A par com esta comparação é, também, possível analisar o comportamento do sinal e verificar a quantidade de ruído e a atenuação do som numa zona com e numa zona sem descontinuidades.

A composição dos provetes analisados é conhecida, através de estudos de espectroscopia apresentados na secção seguinte, assim como a inexistência de defeitos ao longo de todo o provete de calibração de cada amostra. Desta forma, é possível obter uma melhor calibração da sonda de modo a se obter resultados mais fiáveis.

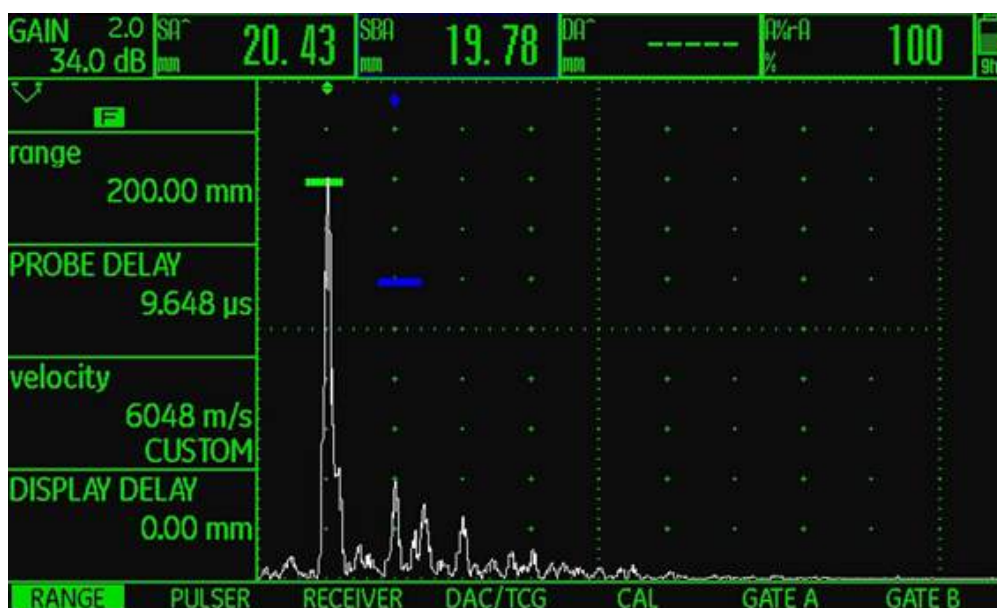


Figura 3.25: Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-02 durante a mesma.

Como é possível observar na figura 3.25, durante a calibração da sonda no provete cortado para o efeito, é visível alguma atenuação do som e a espessura do provete.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

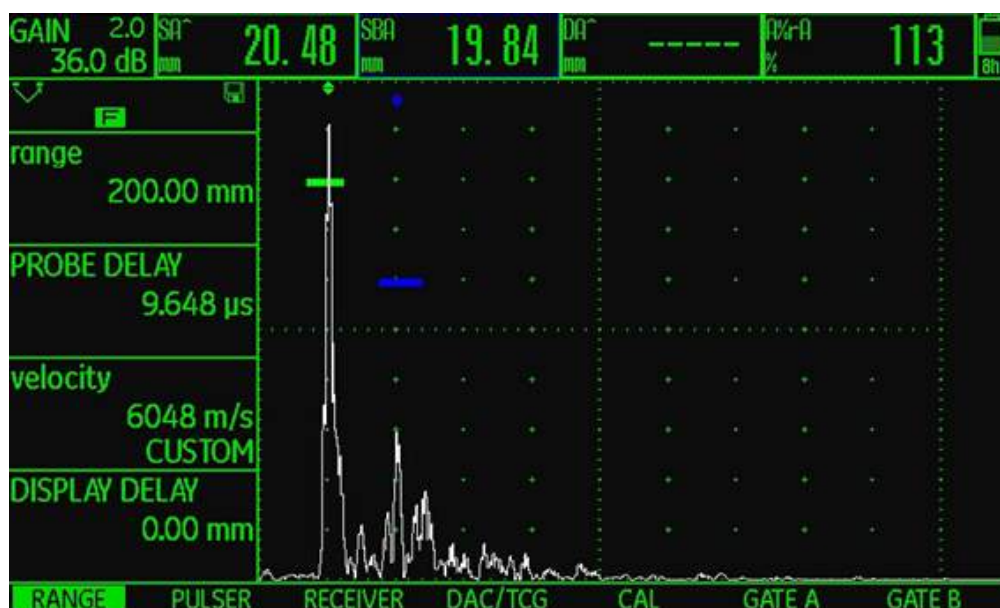


Figura 3.26: Sinal obtido quando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-02-5.

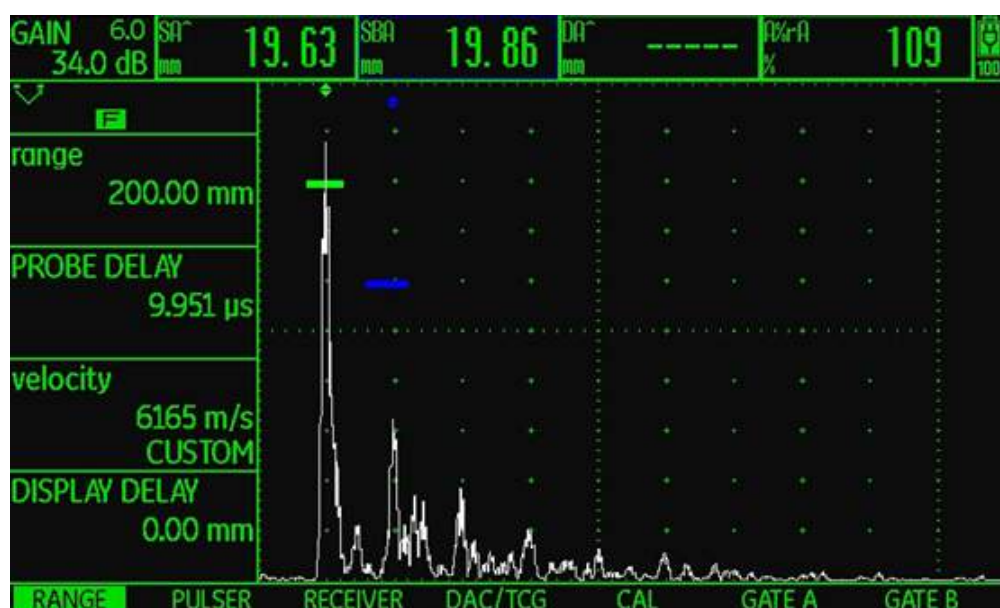


Figura 3.27: Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-03 durante a mesma.

Durante a calibração da amostra L-03, foi possível observar a atenuação do som, como se pode observar na figura 3.27. Em comparação com a calibração da amostra L-02, figura 3.25, nesta amostra é possível observar melhor a atenuação do som.

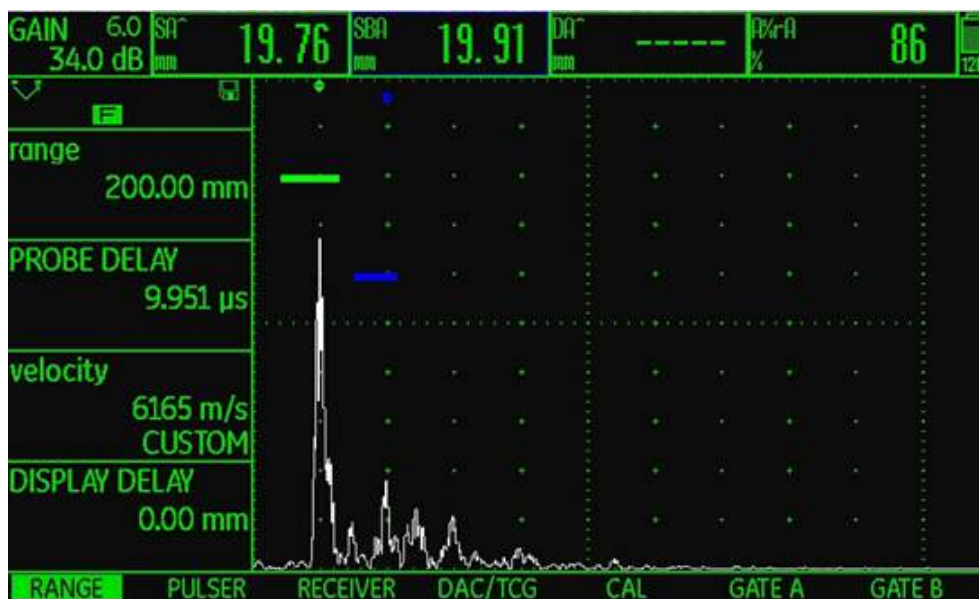


Figura 3.28: Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-03-5.



Figura 3.29: Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-03-2, na deteção de um defeito.



Figura 3.30: Detalhe do provete L-03-2, detetado na figura 3.29

Como se pode verificar da comparação dos sinais obtidos no provete de calibração e em dois provetes diferentes da mesma amostra, nas figuras 3.27, 3.28 e 3.29, o mesmo material não apresenta sempre o

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

mesmo comportamento ao longo de toda a sua superfície. Existem zonas onde é detetada mais atenuação do som, como é o caso do provete de calibração cujo sinal pode ser observado na figura 3.27, do que a atenuação observada no provete L-03-5 cujo sinal pode ser observado na figura 3.28. Um provete com defeito natural passante é o provete 3.30 cuja deteção do defeito pode ser observada no sinal presente na figura 3.29, a aproximadamente 12,84mm de distância da superfície de contacto. Na zona isenta de defeitos, deste provete, o sinal observado continha ainda muito ruído.

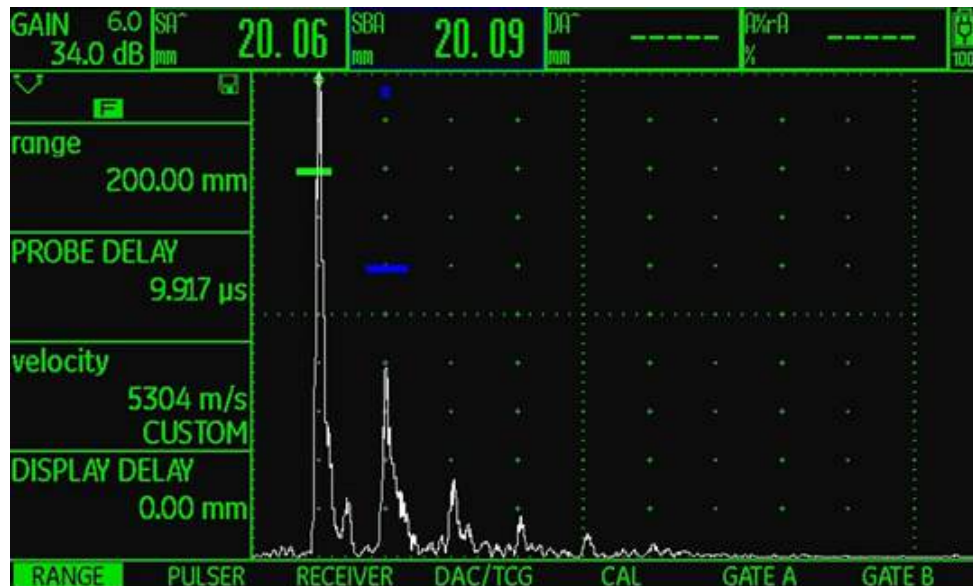


Figura 3.31: Gráfico do comportamento do som no provete de calibração da amostra L-04 durante a mesma.

Como é possível verificar na figura 3.31, a amostra L-04 é a amostra cujo sinal no provete de calibração apresenta mais atenuação do som e cujos picos são mais bem definidos.



Figura 3.32: Sinal obtido aquando a inspeção com técnicas de ultrassons do provete L-04-2.

Porém, como já foi observado nas amostras anteriores, o material não apresenta o mesmo comportamento ao longo de toda a sua superfície. Existem zonas onde é detetada mais atenuação do som do que noutras e este facto nada tem a ver com a existência de defeitos, uma vez que as duas zonas comparadas,

figuras 3.31 e 3.32, não continham defeitos.

Analisando todos os provetes, de cada amostra, pôde observar-se que nos provetes que continham fissuras visíveis, dadas as reduzidas dimensões dos provetes, o sinal recebido pela sonda tinha mais ruído fazendo com que o primeiro eco fosse quase impercetível. Nestas condições tomou-se em atenção a profundidade da onda emitida que variava consoante a altura ou inexistência da fissura ao longo do provete. Os valores obtidos a partir da medição foram comparados com as distâncias verificadas a partir da sua medição com um paquímetro. Desta forma, foi possível admitir que estavam a ser detetados defeitos nos provetes e qual o comportamento dos ultrassons nestas condições.

Mais se pode acrescentar que da análise de provetes de várias amostras, se obtiveram diferentes calibrações para cada uma. Ora, apesar da utilização da mesma sonda e do mesmo equipamento, nas mesmas condições, para amostras diferentes foram obtidas diferentes velocidades como se pode verificar nas figuras 3.25, 3.27 e 3.31. Pode-se relacionar estes resultados com a diferente morfologia das amostras, como se demonstrou na secção 3.1, pois apesar das amostras analisadas apresentarem uma morfologia muito semelhante, as fronteiras de grão apresentam morfologia diferentes. Comparando-os com os resultados obtidos nas análises micro estrutural e química das amostras, na secção 3.1.2, mais uma vez não é possível relacioná-los com os resultados obtidos acima, uma vez que todas as amostras são constituídas pelos mesmo elementos químicos. Desta forma, é possível afirmar que pedra diferentes do mesmo tipo, calcário neste caso, são meios de propagação do som diferentes. Isto pode deve-se à morfologia do comportamento das fronteiras de grão de cada amostra, como foi referido acima.

Depois de devidamente estudados os provetes das várias amostras, as mesmas foram analisadas ao pormenor com as respetivas calibrações. Destes varrimentos foram detetadas algumas descontinuidades até então desconhecidas. Em algumas amostras foram observadas percas de sinal em determinadas zonas, podendo observar-se apenas o pico de fundo com baixa amplitude, como pode ser observado na figura 3.29. Nestes casos, a distância da descontinuidade à superfície de contacto é determinada a partir da profundidade do sinal emitido, a profundidade do eco de fundo. Com estas técnicas, porém, não é possível determinar as dimensões aproximadas da descontinuidade, uma vez que apenas é possível observar o sinal recebido pela sonda que não fornece esse tipo de informação.

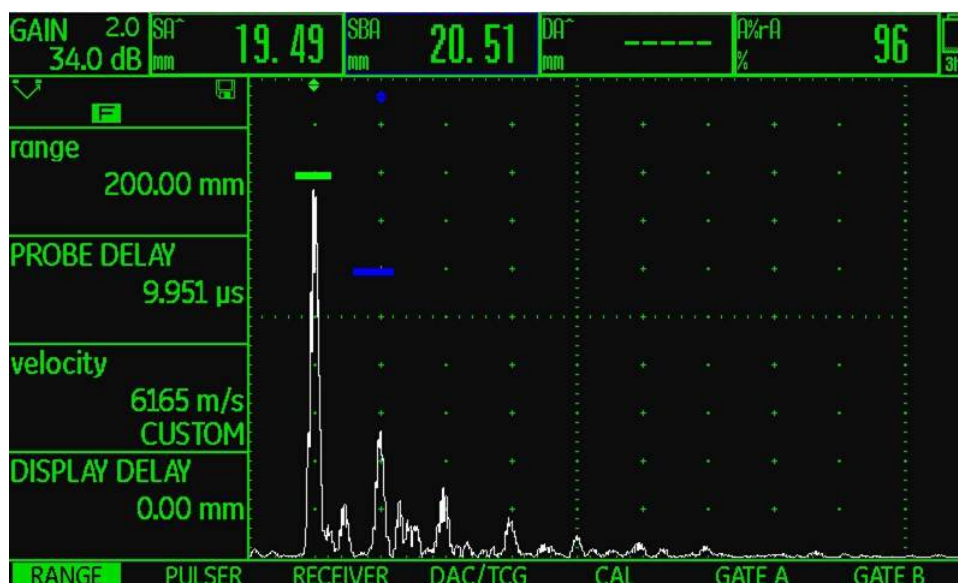


Figura 3.33: Sinal obtido com a calibração que apresentava melhor atenuação do som.

Foram, ainda, estudadas outras amostras, estas sem um estudo tão aprofundado como as anterior-

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

res. Destas amostras não haviam provetes. Neste caso, o objetivo foi o de perceber a aplicabilidade das calibrações realizadas noutras amostras, de modo a se poder descartar a necessidade de um estudo tão aprofundado de cada amostra a inspecionar, o que se tornaria obsoleto em ambiente industrial. Depois de escolhida a calibração com a qual era possível obter os melhores resultados em sinal, figura 3.33 procedeu-se ao varrimento de toda a amostra, conseguindo-se detetar discontinuidades internas e algumas discontinuidades superficiais artificiais, feitas para esse propósito.

Nesta amostra foi possível estudar, também, a capacidade de detecção de discontinuidades artificiais, que consistiam em entalhes feitos na superfície inferior da amostra, com diferentes profundidades.

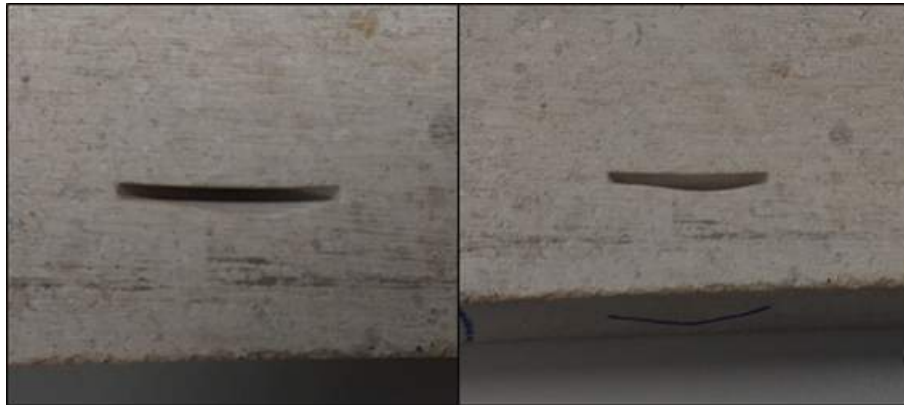


Figura 3.34: Fotografia do detalhe do defeito conhecido na amostra (superfície inferior à superfície de contato).



Figura 3.35: Sinal de resposta obtido na zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.34.

A discontinuidade artificial representada na figura 3.34, está situada perto de uma das extremidades da amostra. Da análise desta, com técnicas de ultrassons convencionais foi possível observar o sinal representado na figura 3.35. Este sinal apresenta uma amplitude muito inferior à amplitude do sinal obtido na maior parte da amostra, figura 3.33. Para além desta observação é possível determinar que o sinal apresenta maior amplitude de ruído, mais próxima da amplitude dos picos pelo sinal descritos. O eco de fundo tem também ele uma amplitude inferior à observada em zonas sem discontinuidades, como seria de esperar. A discontinuidade analisada é detetada com sucesso.



Figura 3.36: Fotografia do detalhe dos defeitos artificiais na superfície oposta à superfície de contacto.

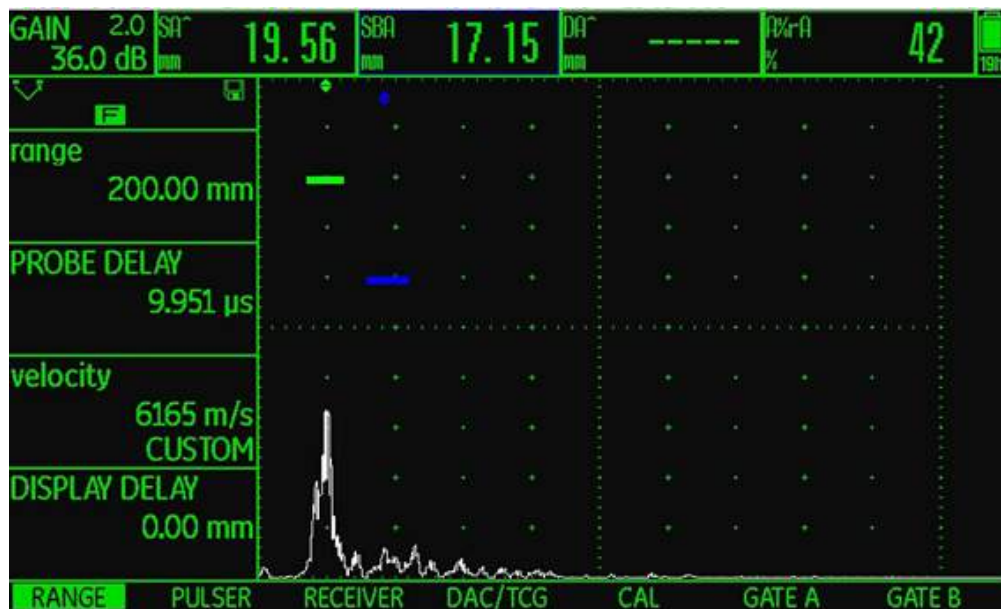


Figura 3.37: Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.36.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 3.38: Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.36.

Perto da descontinuidade atrás estudada, foram feitas outras representadas na figura 3.36. Quando analisadas, o sinal de resposta obtido, figuras 3.37 e 3.38, é possível afirmar que apenas os defeitos mais profundos são detetados, 3.37.



Figura 3.39: Fotografia do detalhe dos defeitos artificiais na superfície oposta à superfície de contacto.

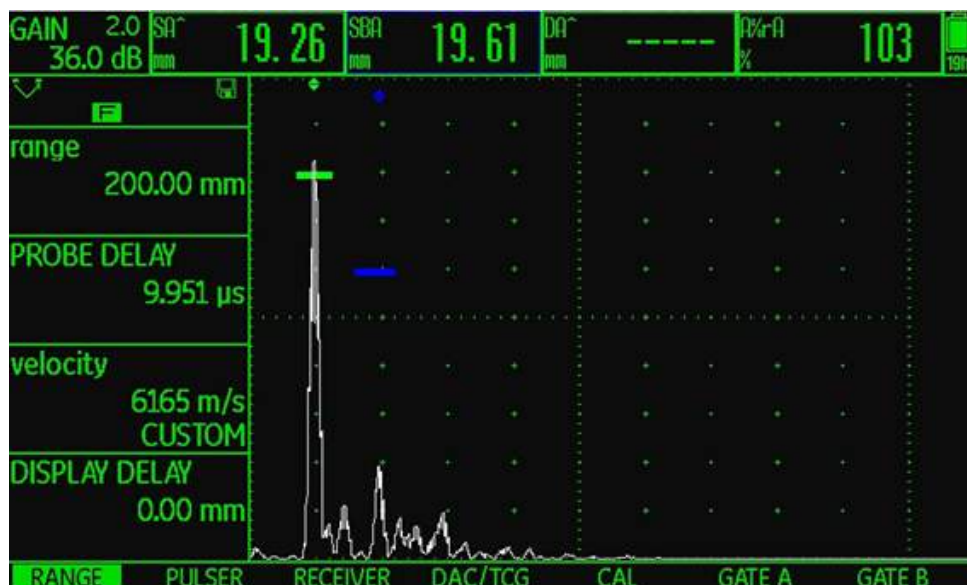


Figura 3.40: Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.39.

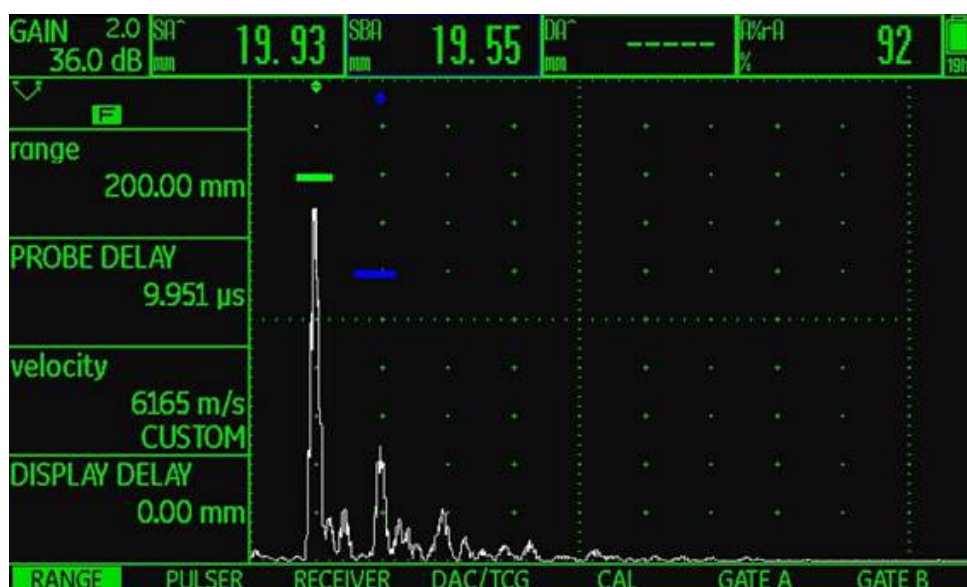


Figura 3.41: Sinal de resposta obtido ao longo da zona onde está situado o defeito artificial conhecido, mostrado na figura 3.39.

Outras discontinuidades foram feitas perto das anteriores, figura 3.39, estas de menores dimensões e profundidades. Neste caso, a partir da observação dos sinais obtidos, figuras 3.40 e 3.41, é possível afirmar que este tipo de discontinuidades não será detetado com as técnicas em desenvolvimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 3.42: Fotografia da zona no centro da amostra onde o sinal de resposta apresenta um comportamento diferente.

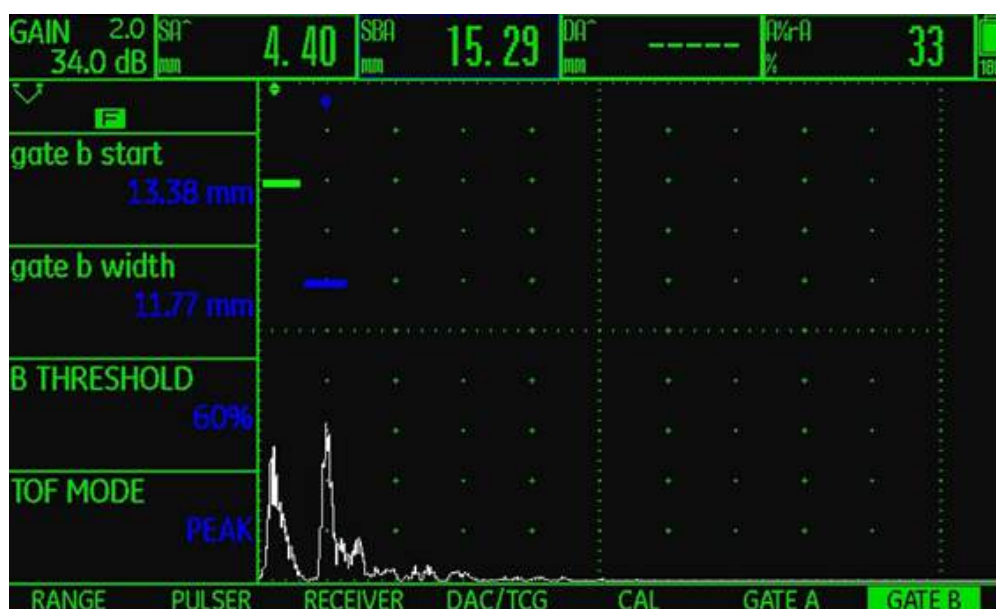


Figura 3.43: Sinal de resposta obtido ao longo da zona indicada na figura 3.42.

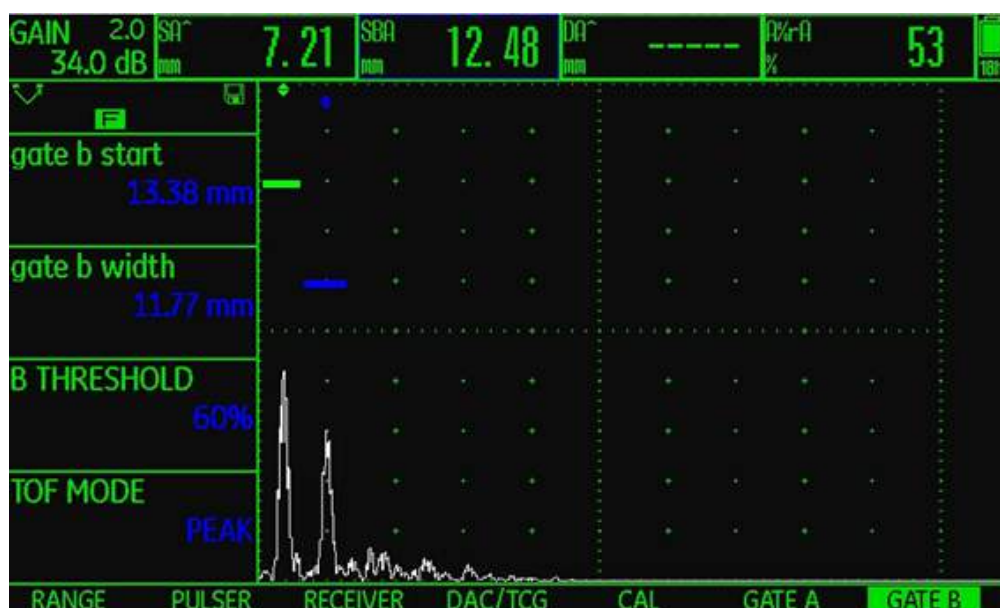


Figura 3.44: Sinal de resposta obtido ao longo da zona indicada na figura 3.42.

Ao longo do varrimento da superfície desta amostra foi detetada, na zona indicada na figura 3.42, uma mudança no comportamento do sinal de resposta obtido. Este comportamento, que pode ser observado nas figuras 3.43 e 3.44, sugere a existência de uma ou mais descontinuidades no local, quando comparado com o comportamento obtido na presença de descontinuidades conhecidas, como é o caso na figura 3.35. A existência desta descontinuidade não pode ser comprovada a partir de resultados obtidos com técnicas de inspeção abordadas anteriormente, uma vez que a aplicação de técnicas de Raios-X, figura 3.13, não indicou para este caso.

3.3.3 Ultrassons *Phased Array*

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos a partir da utilização das técnicas não destrutivas por ultrassons utilizando sondas *phased array*, numa primeira fase com diferentes frequências e posteriormente com a sonda mais indicada para a deteção de descontinuidades internas nas amostras, assim como, o estudo da atenuação do som em três amostras diferentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

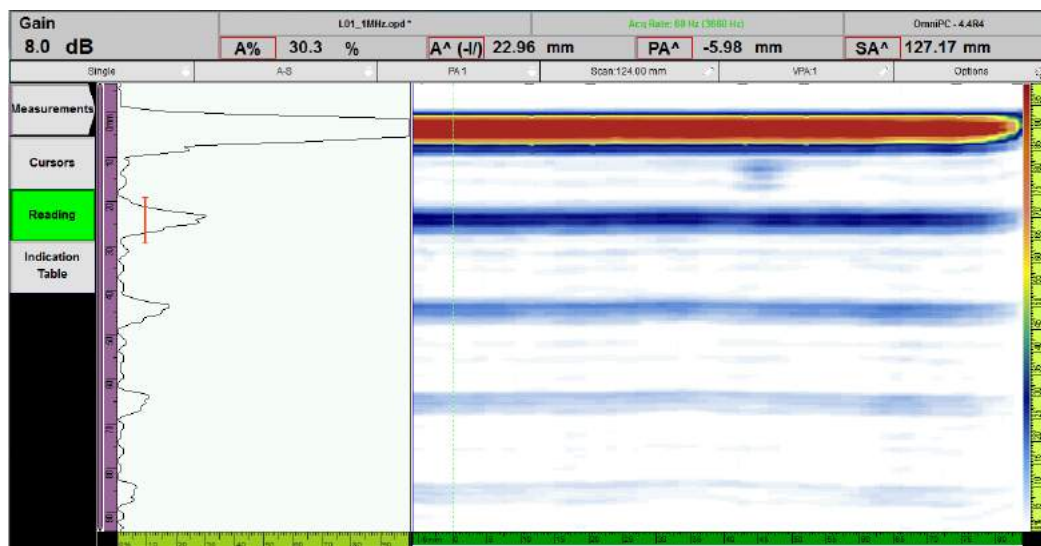


Figura 3.45: Sinal obtido com um feixe constituído por 4 elementos, utilizando uma sonda de 1MHz.

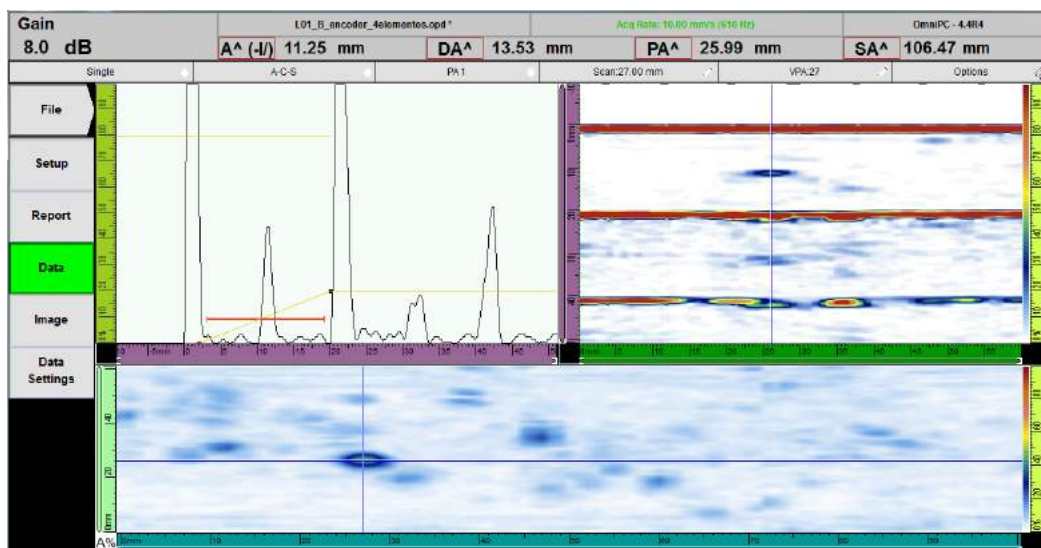


Figura 3.46: Sinal obtido com um feixe constituído por 4 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.

3.3 Ensaios Não Destrutivos

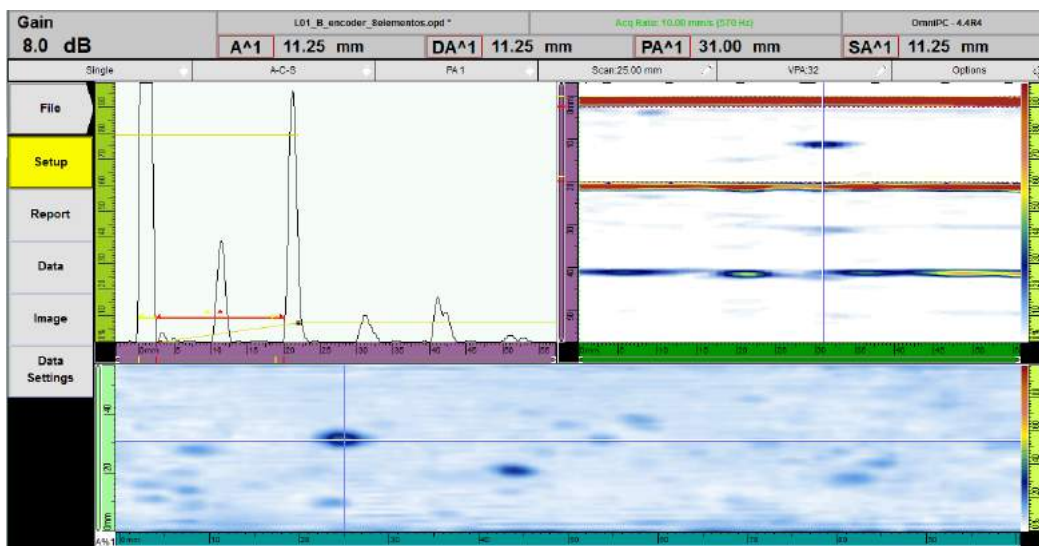


Figura 3.47: Sinal obtido com um feixe constituído por 8 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.

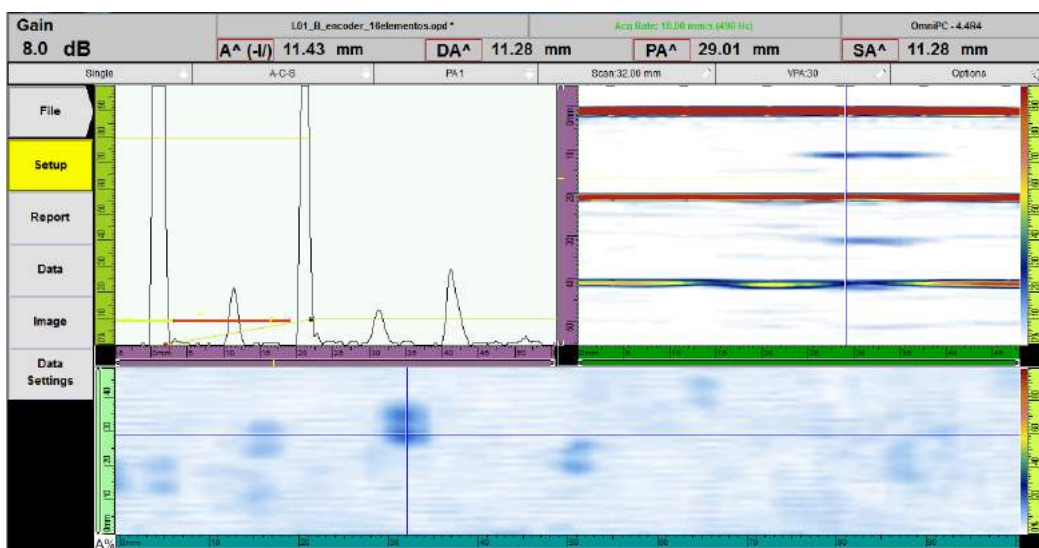


Figura 3.48: Sinal obtido com um feixe constituído por 16 elementos, utilizando uma sonda de 5MHz.

Na amostra foi estudado o comportamento do sinal de ultrassons utilizando uma sonda de 1MHz, figura 3.45. Da observação da figura é possível verificar a elevada amplitude do primeiro pico descrito pelo sinal, o eco de superfície e os restantes picos, o eco de fundo da amostra e suas repetições, estes com amplitude mais baixa. A largura dos picos descritos pelo sinal é também ela elevada. De modo a reduzir estes parâmetros do sinal uma medida a tomar seria diminuir o ganho do amplificador do equipamento, porém, este já se encontra no seu valor mínimo possível, 8dB. Portanto, dado os resultados em análise é possível afirmar que a sonda não é adequada para a análise da espessura de amostra em estudo, 20mm, uma vez que transmite para o material demasiada energia que não vai ser atenuada ao longo do material devido à sua reduzida espessura. Dado o resultado obtido com uma sonda de baixa frequência, o passo a seguir seria o de aumentar a frequência da sonda a utilizar. Posto isto, foi utilizada uma sonda de 5MHz, nas mesmas condições do estudo realizado com a sonda de 1MHz, obtendo-se um sinal do tipo da figura 3.46.

Com a sonda de 5MHz, foi numa fase inicial estudado o comportamento do sinal obtido utilizando grupos de elementos de diferentes tamanhos. A partir deste estudo é possível perceber. Esta análise foi

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

realizada mantendo a sonda sempre no mesmo local da amostra de modo a observar-se sempre a mesma descontinuidade natural, detetada a partir destas mesmas técnicas. A partir comparação das figuras 3.46, 3.47 e 3.48 é possível determinar as diferenças entre os sinais obtidos em cada caso.

As diferenças significativas estão presentes nos C-scans, onde a descontinuidade representada e assinalada pelos cursores do *software*. Quanto maior é o número de elementos que emitem o feixe de ondas sonoras, menor é a resolução do C-scan, ou seja, menos definida está a descontinuidade observada. Para além disso, a amplitude do sinal também vai diminuindo ao longo que o número de elementos vai aumentando. Para a calibração desta sonda foi, então, escolhida a utilização de grupos compostos por 4 elementos.

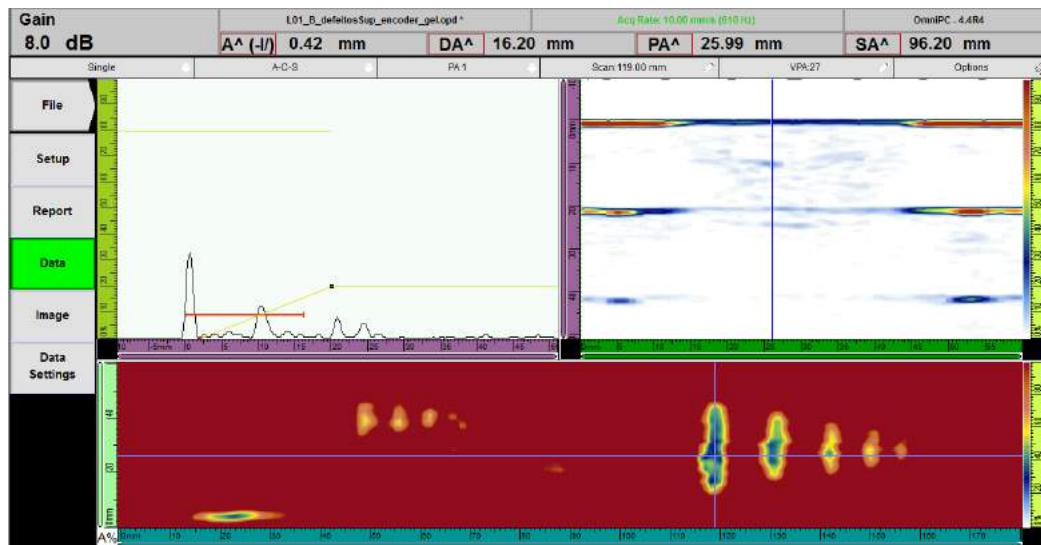


Figura 3.49: Sinal obtido na zona de defeitos artificiais da amostra, utilizando gel como líquido condutor.

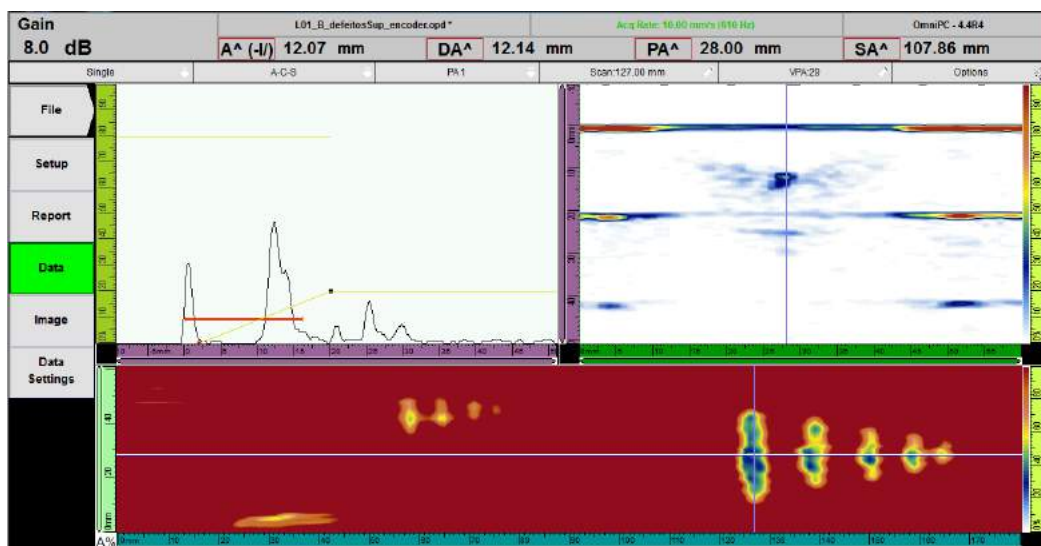


Figura 3.50: Sinal obtido na zona de defeitos artificiais da amostra, utilizando água como líquido condutor.

Numa segunda fase do estudo, foi analisado o comportamento do sinal obtido com a utilização de dois líquidos condutores diferentes: o gel, frequentemente utilizado na maioria das inspeções a materiais metálicos, e a água, meio preferencial para utilização no ambiente industrial a inserir este método de inspeção. Os sinais obtidos encontram-se representados nas figuras 3.49 e 3.50. Observando a

representação do sinal mais à direita (A-scan), é possível verificar que a amplitude do eco de superfície obtido do material utilizando o meio condutor água é muito semelhante ao obtido utilizando o meio condutor gel. O mesmo não se pode verificar do primeiro eco do sinal, que apresenta maior amplitude, quando é utilizado o meio condutor água, do que quando o meio condutor utilizado é o gel.

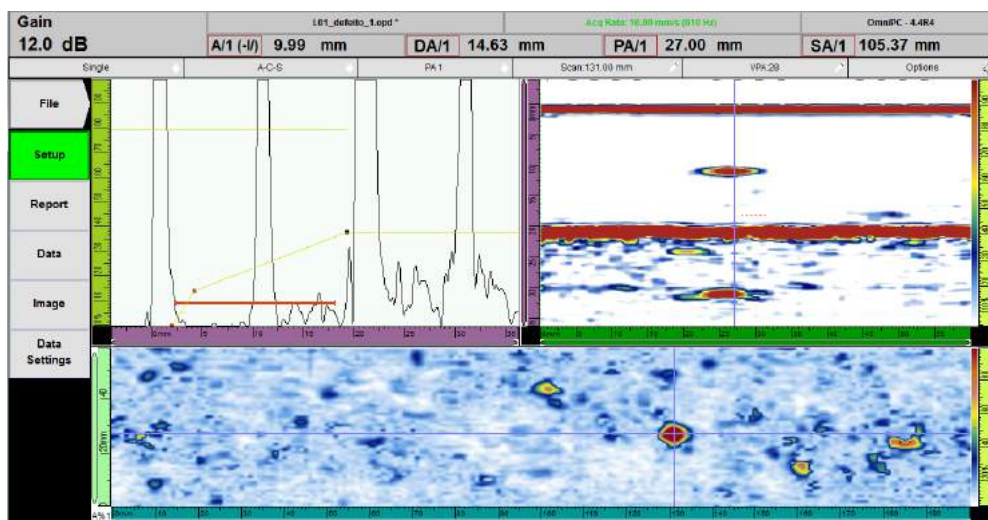


Figura 3.51: Aquisição de sinal na zona de uma descontinuidade, à qual foi realizada uma radiografia presente na secção anterior.

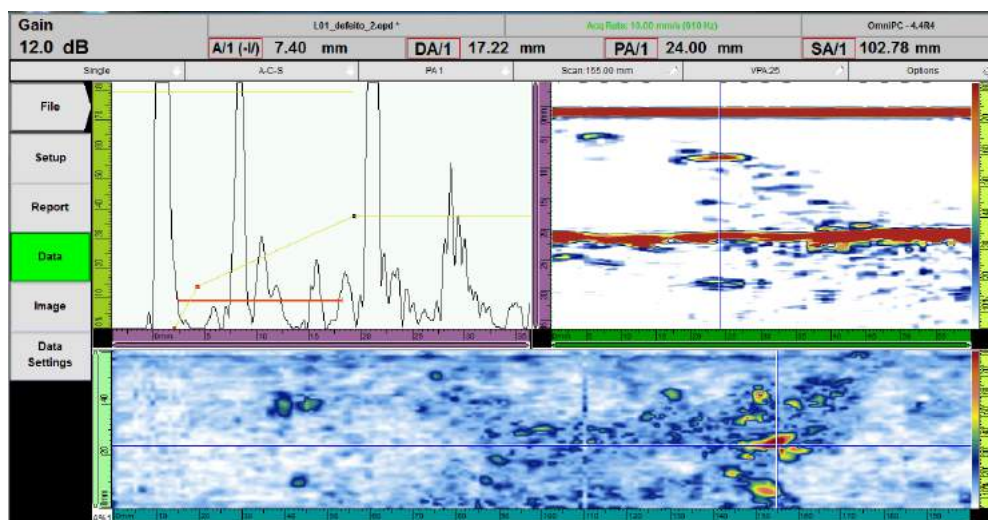


Figura 3.52: Aquisição de sinal na zona de uma descontinuidade, à qual foi realizada uma radiografia presente na secção anterior.

A descontinuidade presente na figura 3.51 aparenta ser uma descontinuidade isolada, de dimensões consideráveis face à grande amplitude de sinal recebido. Esta descontinuidade foi analisada com técnicas de Raios-X, não sendo detetada por estas, como se pode verificar na figura 3.16.

Na figura 3.52, pode observar-se uma mancha de descontinuidades com diferentes profundidades. Neste local da amostra, o sinal apresenta diversos picos eco entre o pico eco de superfície e o pico eco de fundo, muitos deles sendo picos soma. Desta análise pode ser retirado que quando realizado um corte nesta zona, a probabilidade de produção de muito desperdício é muito grande. A esta descontinuidade foi realizada uma radiografia, figura 3.17, como já foi referido na secção anterior. Tal como a descontinuidade anterior, esta também não foi detetada pela técnica de Raios-X. Devido às dimensões consideráveis

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

da mancha de descontinuidades detetada, foi realizado um estudo mais profundo destes casos ainda na secção anterior, que determinou a orientação deste tipo de descontinuidades. Desta forma, é possível afirmar que a descontinuidade presente na figura 3.52 é do tipo da descontinuidade presente no provete da figura 3.19, tendo uma orientação horizontal com a superfície de contacto com a sonda.

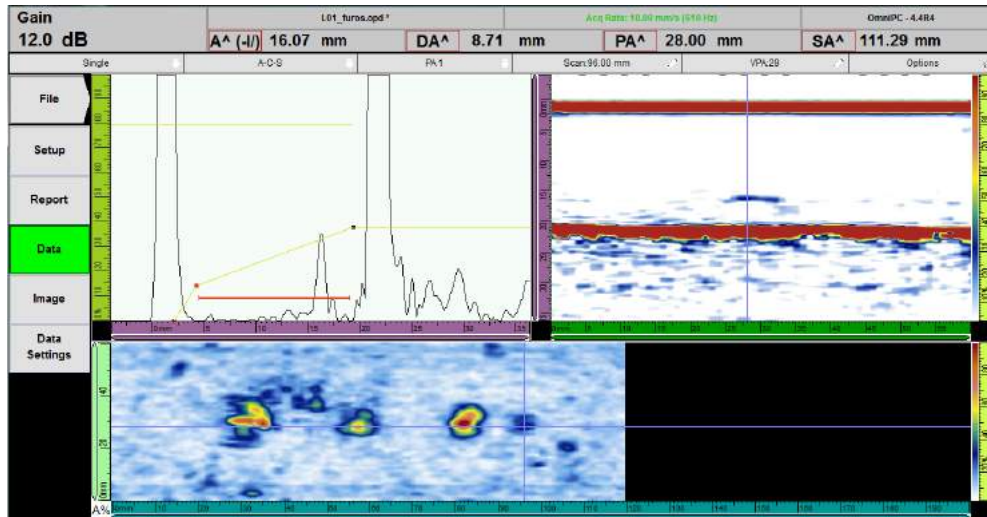


Figura 3.53: Aquisição de sinal numa zona onde foram feitos furos com diferentes diâmetros: 1,5mm, 3mm, 4mm e 5mm.

Foram realizados furos de diferentes diâmetros na superfície inferior da amostra. Estes furos foram analisados a fim de estudar o comportamento perante descontinuidades de diferentes dimensões. Os furos têm 1,5mm, 3mm, 4mm e 5mm de diâmetro e podem observar-se na figura 3.53. Deste estudo, foi possível verificar que um furo com 3mm de diâmetro, imediatamente à esquerda do furo assinalado na figura, apresenta tanto ou mais sinal do que um furo de 5mm, o furo mais à esquerda na figura. Os furos apresentam ainda uma geometria não circular, ao contrário do que seria de esperar. Este facto deve-se ao material ser anisotrópico, o que leva a que a difusão do som tenha comportamentos diferentes do que os verificados em materiais isotrópicos.

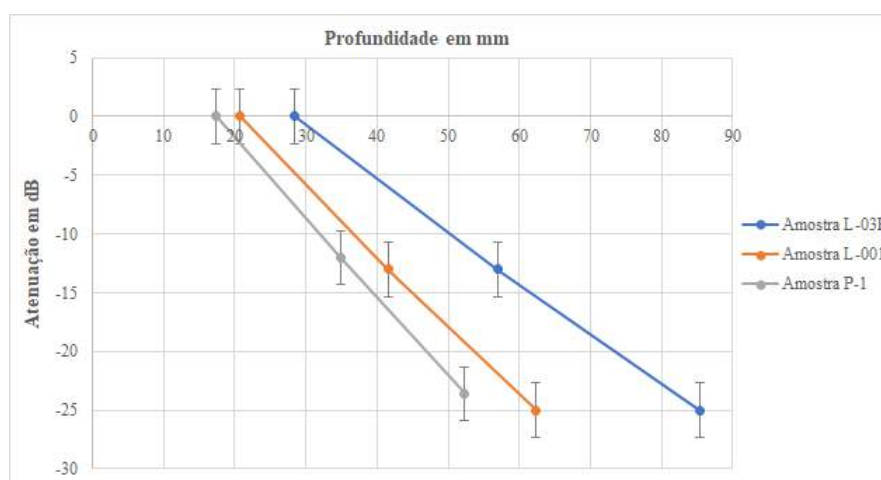


Figura 3.54: Gráfico de atenuação em dB em função da profundidade em mm, para diversas amostras.

No estudo da atenuação da pedra, foram estudadas três amostras diferentes nas mesmas condições de ensaio. Todas as amostras tinham aproximadamente a mesma espessura e foram analisadas com a mesma sonda *phased array* com uma frequência de 5MHz. A velocidade do som foi mantida constante

3.3 Ensaios Não Destrutivos

em $6300m/s$, assim como, a lei focal utilizada pela sonda. Os resultados obtidos foram impressos num gráfico de atenuação em função da espessura da pedra, expresso na figura 3.54. A partir deste gráfico é possível verificar a diferença de atenuação entre amostras, o que quer dizer que peças de diferentes tipos de *Limestone* apresentam diferentes atenuações. Ora, posto esta afirmação é necessário ter em conta o estudo realizado ao longo desta dissertação. Dada a sua natureza anisotrópica e a sua elevada heterogeneidade, para cada pedra a analisar vai ser necessário um conhecimento prévio do comportamento do som.

Capítulo 4

Conclusão

Dado o objetivo proposto no início desta dissertação que consistia no desenvolvimento de métodos não destrutivos aplicados a pedra, é possível, neste momento, afirmar que a inspeção a este tipo de material é possível, porém, com alguns constrangimentos. Ora, durante o estudo realizado ao material em causa, foi possível encontrar métodos de inspeção não destrutiva capazes da deteção de defeitos superficiais e internos em peças de pedra. Os métodos de Raios-X revelaram-se indicados à deteção de defeitos com orientações preferencialmente transversais à peça. Estes defeitos tipicamente são abertos à superfície. O mesmo não se pode dizer no que diz respeito à deteção de defeitos internos pois estes propagam-se, no material, seguindo orientações longitudinais à peça tendo espessuras muito pequenas em relação à espessura da peça. Significa que a espessura de pedra atravessada pela radiação ionizante é muito semelhante no caso de não haver descontinuidades e no caso de haver descontinuidades com orientações longitudinais. Os métodos de inspeção não destrutiva por ultrassons revelaram-se os mais indicados para a deteção de descontinuidades internas ao material uma vez que apesar da sua espessura reduzida, impedem a propagação do som para além deles. Esta interrupção da trajetória do som leva à reflexão da onda pelo qual ele se propaga, que será posteriormente detetada pela sonda utilizada para o efeito. Numa análise global do trabalho realizado pode concluir-se que os métodos de inspeção não destrutiva por Raios-X complementam os métodos de inspeção não destrutiva por ultrassons, na medida em que cada um deles possibilita a deteção de defeitos no material, com orientações diferentes.

Métodos não destrutivos por Raios-X são métodos que complementam a utilização de ultrassons na deteção de defeitos transversais nas peças, que são mais difíceis de detetar por ultrassons. Porém, a utilização destes métodos tem desvantagens uma vez que utiliza radiação ionizante prejudicial à saúde, obrigando à evacuação do local, ou à criação de uma zona delimitada. Necessita também de um determinado período de tempo até a obtenção dos resultados para análise, revelação do filme.

Os métodos de ultrassons permitiram a determinação de defeitos internos porém, a aplicação destes métodos verificou-se complexa devido à natureza muito anisotrópica da pedra, assim como, a sua elevada heterogeneidade. Estes fenómenos levam à elevada atenuação do som por parte de dispersão das ondas tal como da sua absorção, que varia consoante varia o tipo de pedra a analisar. Assim, devido à complexidade do material é necessário adoptar um procedimento diferente para cada bloco de pedra, mesmo que estes sejam provenientes da mesma zona de extração. O que torna difícil a tarefa de desenvolvimento de um protótipo de inspeção não destrutiva direccionado a todos os tipos de pedra, nomeadamente *Limestone*.

Com os métodos por ultrassons utilizando sondas convencionais foi possível perceber que em amostras diferentes o som se propaga com velocidades diferentes e não é possível caracterizar a descontinuidade detetada, apenas a sua existência e localização. A utilização de sondas angulares não se revelou indicada uma vez que estas são mais utilizadas para a deteção de defeitos com orientações preferencial-

mente verticais à superfície da peça e o som emitido por estas necessita de percorrer uma maior trajetória no interior da peça, sofrendo maior atenuação. Isto vai fazer com que o som que é recebido pela sonda tenha menor energia, sendo necessária a aplicação de maior ganho para uma melhoria na visualização do sinal. Assim, para a deteção de defeitos deste tipo, os métodos por Raios-X tornam-se mais vantajosos. Utilizando sondas *phased array* é possível observar a sua extensão no interior da peça a partir das diferentes representações do sinal que os equipamentos utilizados permitem. O dimensionamento destas descontinuidades tornou-se um processo complexo devido à dispersão do som no material, verificando-se na análise de furos feitos na peça que as dimensões calculadas a partir do equipamento de ultrassons não correspondiam às dimensões reais dos furos. A difusão do som em defeitos deste tipo pode dever-se à sua morfologia uma vez que, ao contrário do comportamento verificado em materiais metálicos, o defeito vai propagar-se através das fronteiras de grãos. Por isso, as paredes de um defeito interno artificial neste tipo de material apresentam muitas vezes fissuras que se propagam pelas fronteiras de grão.

Capítulo 5

Trabalhos Futuros

Após o desenvolvimento deste trabalho verificou-se a existência de possíveis estudos futuros como a análise dos resultados dos ensaios mecânicos e a sua posterior relação com os resultados obtidos com métodos não destrutivos por ultrassons, discutidos no presente trabalho. O desenvolvimento de uma base de dados com os parâmetros necessários à inspeção não destrutiva de diversos tipos de pedra, assim como, os procedimentos necessários para cada inspeção. O desenvolvimento de um estudo semelhante ao realizado, direcionado a espessuras mais elevadas. E o estudo sobre dimensionamento de defeitos, uma vez que se tornou tão difícil realizar o dimensionamento dos defeitos observados ao longo deste trabalho. Estes estudos assentam sobre um ideal futuro de maior conhecimento da matéria-prima em questão no âmbito dos métodos não destrutivos de inspeção.

Bibliografia

- [1] F. P. Almeida, J. Barata, and P. Barros. *Ensaaios Não Destrutivos*. ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 1992.
- [2] O. L. Andreson and R. C. Liebermann. Sound velocities in rocks and minerals. *The Scientific World Journal*, 7885(7885-4):(195 páginas), 1966.
- [3] A. Barata and L. Trindade. Indústria da pedra. *Jornal de Leiria*, 1822:3–9, 2019.
- [4] J. Chen, Z. Xu, Y. Yu, and Y. Yao. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques. *NDTE International*, 67:10–16, 2014.
- [5] G. Concu, B. D. Nicolo, and M. Valdes. Prediction of building limestone physical and mechanical properties by means of ultrasonic p-wave velocity. *The Scientific World Journal*, 2014(508073):8 páginas, 2014.
- [6] P. Gaviglio. Longitudinal waves propagation in a limestone: The relationship between velocity and density. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22:299–306, 1989.
- [7] J. LTD. Jsm-6700f field emission scanning electron microscope - users manual. URL <http://www.engineering.jhu.edu/labs/wp-content/uploads/sites/76/2016/01/JEOL-JSM-6700F-SEM-Users-Manual.pdf>. Acesso em 18 setembro 2019.
- [8] Olympus. Transdutores e sondas, . URL <http://www.olympus-ims.com/pt/probes/>. Acesso em 24 setembro 2019.
- [9] Olympus. An introduction to ultrasonic transducers for nondestructive testing, . URL <http://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>. Acesso em 25 setembro 2019.
- [10] I. N. Prassianakis and N. I. Parssianakis. Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42:191–198, 2004.
- [11] A. Schubnel, O. Nishizawa, K. Masuda, X. J. Lei, Z. Xue, and Y. Guéguen. Velocity measurements and crack density determination during wet triaxial experiments on oshima and toki granites. *The Scientific World Journal*, 160:869–887, 2003.
- [12] SEF, AEND, CNDT, CrSNDT, MAROVISZ, and RELACRE. *Ultrassons, Manual de Estudo*. PRO-QUALINDT - Transferring European Training Programme for the qualification of NDT personnel, 2013.
- [13] G. S. . I. Technologies. Ultrasonic transducers. URL <http://www.instrumart.com/assets/GEIT-Transducer-catalog.pdf>. Acesso em 24 setembro 2019.

BIBLIOGRAFIA

- [14] E. Vasanelli, D. Colangiulli, A. Calia, M. Sileo, and A. Aiello. Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics*, 2015(0041-624X):8 páginas, 2015.
- [15] G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, C. A. S. Alves, and J. Pamplona. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48:453–466, 2008.
- [16] U. Wiberg. Checking concrete by quantitative ultrasonics. *The Scientific World Journal*, 73/1/73/2: 189–194, 1995.
- [17] Zeiss. Reference library. URL <http://www.zeiss-campus.magnet.fsu.edu/referencelibrary/>. Acesso em 25 setembro 2019.